

# ETUDE PRELIMINAIRE A LA REALISATION DE BILANS ENVIRONNEMENTAUX SUR LE CHAUFFAGE AU BOIS

## Partie 2 : Mise en œuvre de méthodes de caractérisation d'impact sur le changement climatique

Novembre 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par :  
FCBA (Claire Cornillier), CIRAD (Anthony Benoist), CNPF (Olivier Gleizes)  
N° de contrat : 1401C0030

Coordination technique ADEME :

Alice GUEUDET

Miriam BUITRAGO

– Direction *Productions et Energies Durables* \ Service *Bioressources*  
– Direction *Productions et Energies Durables* \ Service *Agriculture et Forêts*



## RAPPORT D'ETUDE

En partenariat avec :



## REMERCIEMENTS

Nous remercions tout particulièrement Alice Gueudet (ADEME) et Miriam Buitrago (ADEME) pour leur forte et enrichissante implication technique dans la réalisation de cette étude.

Nous remercions également l'ensemble des membres du comité de suivi de l'étude :

- Marie April (ADEME) ;
- Frédéric Branger (MAAF) ;
- Gérard Deroubaix (FCBA) ;
- Alice Fautrad (ADEME) ;
- Isabelle Feix (ADEME) ;
- Julia Grimault (CDC climat) ;
- Martine Leclercq (MEDDE) ;
- Joseph Lunet (MEDDE) ;
- Azadeh Marzin (ADEME) ;
- Jérôme Mousset (ADEME) ;
- Olivier Picard (CNPFP) ;
- Jean-Christophe Pouet (ADEME) ;
- Caroline Rantien (ADEME) ;
- Olivier Réthoré (ADEME) ;
- Julie Thomas (CNPFP) ;
- Murielle Trouillet (MAAF) ;
- Estelle Vial (FCBA) ; et
- Lise Wléricq (MAAF).

Enfin, les auteurs remercient leurs collègues du groupe de recherche ELSA (Environmental Lifecycle and Sustainability Assessment), de l'unité de recherche BioWooEB (Biomasse, Bois, Energie, Bioproduits) du CIRAD, des pôles ENSA (Environnement Santé), EEP (Energie Economie Prospective) et BSA (Biotechnologie Sylviculture Avancée) de FCBA, pour les différents échanges et discussions qui ont eu lieu sur les thèmes abordés dans ce rapport et qui ont permis d'enrichir et d'améliorer celui-ci.

## CITATION DE CE RAPPORT

**ADEME. Cornillier Claire, Benoist Anthony, Gleizes Olivier. 2015. Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois – Partie 2 : Mise en œuvre de méthodes de caractérisation d'impact sur le changement climatique. 74 p.**

### En français :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

### En anglais :

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

## Table des matières

Résumé .....	5
Abstract .....	5
1. Objectif et champ du volet « mise en œuvre » .....	7
1.1. Objectif du volet « mise en œuvre » .....	7
1.2. Champ du volet « mise en œuvre » .....	8
Description des systèmes d'étude .....	8
Fonction des systèmes d'étude, unité fonctionnelle, et flux de référence .....	9
Frontières des systèmes d'étude .....	9
2. Données et hypothèses .....	14
2.1. Relatives à la description des stocks de carbone de biomasse liés à l'usage des sols .....	14
Plantation de douglas .....	14
TCR d'eucalyptus .....	16
Taillis et futaie sur souche de châtaignier .....	18
Occupation naturelle .....	20
Usage agricole .....	21
2.2. Autres données et hypothèses .....	22
Relatives aux émissions de GES biomasses liées à la combustion de la biomasse en chaudière .....	22
Relatives aux émissions de GES fossiles liées à la production de la chaleur à partir de biomasse .....	22
Relatives aux émissions de GES fossiles liées à la production de la chaleur à partir de gaz naturel .....	22
2.3. Relatives aux méthodes .....	23
« Comptabilité totale avec PRG » .....	23
« Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps » .....	23
« Conversion ILCD » .....	23
Méthode d'usage du sol Müller-Wenk .....	24
Méthode d'usage des sols projet .....	25
3. Résultats .....	31
3.1. Influence du choix de la méthode d'impact sur les résultats de chaque scénario en approche attributionnelle .....	31
Influence de la méthode d'impact relative au mécanisme des émissions .....	32
Influence de la méthode d'impact relative au mécanisme de la transformation de l'usage du sol .....	32
Influence de la méthode d'impact relative aux mécanismes de l'occupation de l'usage du sol .....	33
Influence des combinaisons couvrant l'ensemble des mécanismes .....	34
3.2. Analyse de la sensibilité aux données et hypothèses en approche attributionnelle .....	52
Sensibilité au choix du positionnement du $t_0$ dans le cycle .....	52

Sensibilité à l'usage de référence .....	55
Sensibilité au choix d'affectation de la transformation de l'usage du sol à l'origine d'une production additionnelle .....	58
3.3. Influence du choix de la méthode d'impact sur les résultats en approche conséquentielle .....	61
Influence de la méthode d'impact relative au mécanisme des émissions.....	61
Influence de la méthode d'impact relative au mécanisme de la transformation de l'usage du sol .....	63
Influence de la méthode d'impact relative aux mécanismes de l'occupation de l'usage du sol .....	63
Influence des combinaisons couvrant l'ensemble des mécanismes.....	63
Indicateur « temps de retour GES » .....	64
4. Conclusions .....	67
Références bibliographiques .....	68
Index des tableaux et figures.....	69
Sigles et acronymes .....	72



## Résumé

Dans le cadre de ce volet de l'étude, des analyses de cycle de vie (ACV) ont été réalisées :

- En approche attributionnelle, sur la production de chaleur à partir de biomasse forestière issue de quinze origines différentes (trois essences (douglas, eucalyptus, châtaigner) suivant différentes sylvicultures (taillis, TCR, futaie) avec ou sans évolution de pratiques sylvicoles (raccourcissement de la révolution, intensification de la récolte...)) ; et
- En approche conséquentielle, sur une évolution de récolte d'un TCR d'eucalyptus visant à produire de la chaleur.

Elles ont permis tout d'abord de tester la mise en œuvre de méthodes de caractérisation de l'impact sur le changement climatique, celles les mieux notées à l'issue du premier volet de l'étude sur l'état de l'art, ainsi que celle développée dans le cadre du projet. Des difficultés et limites non encore identifiées ont pu être mises en évidence, notamment concernant la méthode de comptabilité totale avec les pouvoirs de réchauffement global (PRG) ajustés dans le temps. Au-delà de la faisabilité de la mise en œuvre, ces évaluations ont permis d'illustrer et de mieux comprendre les divergences et points communs des différentes approches de l'ACV (attributionnelle versus conséquentielle), ainsi que des différentes méthodes d'impacts testées (Comptabilité totale avec PRG, Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, Conversion ILCD, Usage du sol/Müller-Wenk, Usage du sol/Projet).

Les résultats ont montré que la méthodologie ACV, quelle que soit l'approche, peut permettre avec certaines méthodes d'impact d'obtenir des résultats sensibles au système de production de biomasse via la prise en compte du cycle du carbone biogénique, ce que la méthode « neutralité carbone » ne permet pas. Cette sensibilité provient des mécanismes liés à l'usage du sol qui tiennent compte d'un potentiel de séquestration de carbone. Ces mécanismes peuvent se rapporter à une transformation relative à un changement d'usage incluant des évolutions de gestion sylvicole, mais également à une occupation. Ces méthodes peuvent revêtir des concepts différents, basés sur plusieurs notions comme le stock moyen de carbone à l'équilibre, la dynamique des variations de stock de carbone, un usage de référence, l'affectation aux occupations des stocks suivant différentes logiques. La mise en œuvre de ces méthodes nécessite une description des systèmes de production de la biomasse forestière qui fait appel à de nombreuses données, hypothèses et modèles, pour lesquels les résultats peuvent être très sensibles. Pour envisager leur application en routine, une base de données serait à construire.

Les résultats de ce volet permettent ainsi de compléter l'état de l'art sur un des enjeux majeurs de l'évaluation environnementale du chauffage bois qu'est le changement climatique, afin d'aider à établir des recommandations méthodologiques sur l'évaluation de ces systèmes de façon la plus éclairée que possible.

## Abstract

Within the framework of this part of the study, Life Cycle Assessments (LCA) were performed:

- In an attributional approach, on the production of heat from forest biomass resulting from fifteen different origins (three species (Douglas-fir, eucalyptus, chestnut) according to various silviculture (coppice, short rotation coppice, high stand) with or without evolution of forestry practices (shortening of the revolution, intensification of harvest...)) ; and
- In a consequential approach, on a harvesting evolution of eucalyptus short rotation coppice in order to produce heat.

First of all, they made it possible to test the implementation of characterization methods of the impact on the climate change, those best noted of the first part of the study on the state of art, as well as that developed within the framework of the project. Not yet identified difficulties and limits could be put in evidence, in particular concerning the total accounting method with the GWP adjusted in time. Beyond the feasibility of the implementation, these evaluations made it possible to illustrate and better understand the divergences and common points of the various approaches of LC A (attributional versus consequential), as well as various methods of impacts tested (Total accounting with GWP, Total accounting with GWP adjusted in time, ILCD conversion, Land use/Müller-Wenk, Land use/Project).

The results showed that LCA methodology, whatever the approach, can make it possible with certain methods of impact to get sensitive results to the system of production of biomass taking into account the cycle of biogenic carbon, which the method "neutrality carbon" does not allow. This sensitivity comes from the mechanisms related to the land use which take account of a potential of carbon sequestration. These mechanisms can refer to a transformation relating to a

change of land use including forestry management evolutions, but also to an occupation of land. These methods can be of different concepts, based on several characteristic of the occupation such as the average carbon stock to a balance, the dynamics of the carbon stocks, a reference land use, the allocation of carbon stocks to the occupations according to various logics. The implementation of these methods requires a description of the systems of forest biomass production which needs many data, assumptions and models, for which the results can be very sensitive. To consider their application in routine, a database should be built.

The results of this part of the study supplement the state of art on one of the major stakes of the environmental evaluation of the wood heating which is the climate change, in order to help to establish methodological recommendations on these systems assessment in the most enlightened way than possible.

L'étude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage bois a pour objectif d'établir des recommandations sur le plan méthodologique pour mener des évaluations environnementales par Analyse de Cycle de Vie (ACV) dans le domaine du chauffage bois. Cette étude se décompose en trois volets principaux :

- L'établissement d'un état de l'art ;
- La réalisation d'une mise en œuvre de différentes méthodes de caractérisation d'impact sur le changement climatique sur des cas d'étude ; et
- L'établissement de recommandations méthodologiques.

Le présent rapport constitue le livrable associé au deuxième volet. Pour en faciliter la compréhension, il est conseillé au préalable de prendre connaissance du rapport sur l'état de l'art.

## 1. Objectif et champ du volet « mise en œuvre »

### 1.1. Objectif du volet « mise en œuvre »

L'objectif premier de ce volet est d'étudier la sensibilité des résultats aux méthodes de caractérisation d'impact sur le changement climatique tenant compte des spécificités des systèmes d'étude relatives au cycle du carbone biogénique. Les méthodes retenues sont celles qui ont été identifiées et jugées d'intérêt scientifique suffisant dans le volet « état de l'art » de l'étude. Ces méthodes peuvent être classées de la manière suivante :

- Evaluation à partir d'une comptabilité dans l'inventaire de cycle de vie des flux vis-à-vis de l'atmosphère participant au cycle du carbone biogénique (captations de CO<sub>2</sub> et émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>), non temporalisés :
  - Méthode des PRG statiques, méthode conventionnelle, appelée par la suite « Comptabilité totale avec PRG » ;
- Evaluation à partir d'une comptabilité dans l'inventaire de cycle de vie des flux vis-à-vis de l'atmosphère participant au cycle du carbone biogénique (captations de CO<sub>2</sub> et émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>), temporalisés :
  - Méthode des PRG ajustés dans le temps, appelé par la suite « Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps » ;
- Evaluation à partir d'une comptabilité dans l'inventaire de cycle de vie de l'usage du sol (occupation et transformation) :
  - Méthode de conversion directe des variations de stock de carbone en flux, méthode adaptée de l'ILCD sur les changements d'usage des sols et élargie à toute transformation dont celle générée par des changements de pratiques sylvicoles, appelée par la suite « Conversion ILCD » ;
  - Méthode développée par Müller-Wenk, appliquant le cadre conceptuel de l'usage du sol développé par Milà i Canals en ACV au potentiel de séquestration de carbone d'un sol via un rapport de durées de vie moyenne du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, appelée par la suite « Usage du sol Müller-Wenk » ;
  - Méthode développée dans le cadre du projet, appliquant le cadre conceptuel de l'usage du sol développé par Milà i Canals en ACV au potentiel de séquestration de carbone d'un sol via l'utilisation des PRG ajustés dans le temps, appelée par la suite « Usage du sol Projet ».

Suivant les mécanismes environnementaux couverts par les méthodes, il est également possible de procéder à leurs associations afin d'être plus exhaustif dans l'évaluation :

- Soit en couvrant l'ensemble des mécanismes environnementaux, avec les combinaisons suivantes :
  - La comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps ;
  - La comptabilité totale avec PRG, et l'usage du sol Müller-Wenk ;
  - La comptabilité totale avec PRG, et l'usage du sol Projet ;
  - La comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps limitée aux émissions, et l'usage du sol Projet ;
- Soit en couvrant ces mécanismes de façon partielle avec la combinaison des méthodes les plus reconnues [Comptabilité totale avec PRG et Conversion ILCD].

L'analyse consiste à mesurer l'influence du choix de la méthode ou des combinaisons de méthodes sur les résultats de chaque système étudié dans le cadre de ce volet, ainsi que leur sensibilité à certaines données et hypothèses nécessaires à la mise en œuvre de ces méthodes.

Par ailleurs, cette étude a également pour objectif, pour les cas d'étude qui peuvent s'y prêter, de mettre en œuvre l'évaluation du « temps de retour GES », pour expliquer ses spécificités, différences et points communs par rapport aux autres évaluations réalisées dans le cadre de cette étude.

## 1.2. Champ du volet « mise en œuvre »

### Description des systèmes d'étude

Les systèmes étudiés dans le cadre de ce volet portent sur :

- En approche attributionnelle, la production de chaleur à partir de biomasse forestière issue de quinze origines différentes (trois essences (douglas, eucalyptus, châtaigner) suivant différentes sylvicultures (taillis, TCR, futaie) avec ou sans évolution de pratiques sylvicoles par rapport à l'occupation antérieure (raccourcissement de la révolution, intensification de la récolte...)) ; et
- En approche conséquentielle, l'évolution de récolte d'un TCR d'eucalyptus servant à produire de l'énergie, en imaginant pour l'exercice (sans correspondance à une réalité) que cette évolution ait des conséquences importantes sur la production de chaleur en France.

Pour se concentrer sur l'étude de la prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique des méthodes d'évaluation vis-à-vis du changement climatique, les étapes non impliquées dans ce cycle, c'est-à-dire celles du traitement de la biomasse pour fabriquer le combustible, du transport, ainsi que de la conversion énergétique, ont fait l'objet d'un scénario unique. Ce scénario a été défini de la façon suivante :

- Déchiquetage bord de route ou sur parcelle des bois récoltés ;
- Transport par camion des plaquettes sur une faible distance ;
- Séchage des plaquettes ;
- Combustion dans une chaudière avec un rendement de 85% pour fournir de la chaleur.

En revanche, en ce qui concerne la production de biomasse forestière, plusieurs scénarios en approche attributionnelle ont été retenus afin :

- D'étudier la sensibilité des résultats aux choix de la méthode d'évaluation pour différents scénarios ;
- De disposer de paramètres contrastés de variation de stocks et de flux de carbone biogénique dans les peuplements ligneux pour étudier la sensibilité de chaque méthode à rendre compte de leurs effets sur le changement climatique :
  - La durée de révolution ;
  - La récolte ou l'absence de récolte des rémanents ;
  - Le niveau de stock moyen sur pied ;
  - La dynamique des accroissements courants.

Les scénarios de production de la biomasse forestière retenus sont présentés dans le tableau ci-après. Afin de disposer suffisamment de données pour réaliser les modélisations, ces scénarios ont été pris dans le cadre strict de la sylviculture, n'intégrant pas par définition la possibilité d'un manque voire d'une absence de gestion (ni dans l'occupation étudiée ni dans l'occupation antérieure).

Scénario	Essence	Structure	Révolution	Récolte	Antécédent
D 80	Douglas	Futaie régulière	80 ans	Bois fort BO, BIBE	Identique
D 60	Douglas	Futaie régulière	60 ans		Identique
D 40	Douglas	Futaie régulière	40 ans		Identique
D 60 (60←80)	Douglas	Futaie régulière	60 ans		D 80
D 40 (40←60)	Douglas	Futaie régulière	40 ans		D 60
D 60 (60←40)	Douglas	Futaie régulière	60 ans		D 40
E bf	Eucalyptus	TCR	30 ans	Bois fort BIBE	Identique
E ae	Eucalyptus	TCR	30 ans	Arbre entier BIBE	Identique
E ae (ae←c)	Eucalyptus	TCR	30 ans		Culture
E ae (ae←bf)	Eucalyptus	TCR	30 ans		E bf
E bf (bf← ae)	Eucalyptus	TCR	30 ans	Bois fort BIBE	E ae
C t	Châtaignier	Taillis simple	20 ans	Bois fort BO, BIBE	Identique
C f	Châtaignier	Futaie sur souche	45 ans		Identique
C f (f←t)	Châtaignier	Futaie sur souche	45 ans		C t
C t (t←f)	Châtaignier	Taillis simple	20 ans		C f

BO : Bois d'Oeuvre ; BIBE : Bois d'Industrie Bois Energie

**Tableau 1 – Scénarios de production de la biomasse retenus pour effectuer les analyses de sensibilité sur les méthodes de prise en compte des effets des stocks et flux de carbone biogénique sur le changement climatique**

L'ensemble des données et hypothèses ayant servi dans les calculs sont fournies dans la section 2.1.

Par ailleurs, pour l'évaluation de cette étape de production de la biomasse, il a été nécessaire pour certaines méthodes de définir une occupation dite « naturelle », c'est-à-dire celle en l'absence de l'occupation du sol par l'homme, et d'étudier l'influence de variations dans la définition de cette occupation naturelle sur les résultats. Les données et hypothèses retenues pour définir ce scénario sont présentées dans la section 2.2.

Enfin, afin de pouvoir exprimer les résultats des systèmes étudiés en termes de réduction d'émissions de GES par rapport à un système équivalent fossile (comme l'exige la directive énergie renouvelable de 2009), ainsi que pour les calculs en approche conséquentielle, un système équivalent fossile a été défini comme la production de chaleur à partir d'une chaudière fonctionnant au gaz naturel avec un rendement de 95%.

## Fonction des systèmes d'étude, unité fonctionnelle, et flux de référence

Dans l'application de l'ACV à la production d'énergie à partir de biomasse ligneuse, la fonction rendue peut s'exprimer de différentes manières suivant la question posée. Cette expression peut varier selon :

- Le niveau dans la chaîne des processus énergétiques : l'exploitation d'un territoire pour produire de la biomasse à usage énergétique en partie ou en totalité, la mise à disposition de combustible (ex : approvisionner en combustible englobant sa production et sa distribution), la production ou mise à disposition d'énergie (ex : produire de l'énergie englobant production et distribution du combustible, ainsi que le système de conversion énergétique), ou encore le service rendu par le processus énergétique final (ex : assurer le chauffage d'une maison, englobant l'ensemble des processus) ;
- La nature du combustible (bois, charbon, ...) ou du système de conversion (thermique, électrique, ...) ;
- L'étendue du système étudié (une installation bien spécifique ou la production d'un mix énergétique).

Dans le cas de ce travail, la fonction rendue des systèmes étudiés est :

- En approche attributionnelle, la production de chaleur fournie ; l'unité fonctionnelle à laquelle les résultats se rapportent est le GJ de chaleur fournie ;
- En approche conséquentielle, la production de chaleur additionnelle fournie ; l'unité fonctionnelle à laquelle les résultats se rapportent est le GJ de chaleur additionnelle fournie.

Par ailleurs, afin d'exprimer les résultats par rapport à l'exigence de la directive énergie renouvelable de 2009 sur le taux de réduction d'émissions de GES par rapport à un système non renouvelable, les résultats ont été également comparés à ceux obtenus avec une chaudière fonctionnant au gaz naturel, exprimés en relatif (% de réduction).

Enfin, il faut noter que pour l'évaluation du « temps de retour GES », méthode développée spécifiquement pour étudier avec une approche conséquentielle une transformation d'usage du sol permettant une augmentation de la productivité mais s'accompagnant également d'une baisse du stock moyen de carbone à l'hectare, l'expression des résultats diffère de la méthode ACV. En effet, cette méthode n'essaye pas de quantifier l'effet sur le climat de la transformation, c'est-à-dire de chaleur additionnelle produite à partir de la biomasse additionnelle, mais cherche à déterminer le moment à partir duquel cette évolution d'usage du sol apportera un bénéfice en termes de climat.

## Frontières des systèmes d'étude

### Frontières techniques

Les processus retenus dans les frontières des systèmes d'étude sont tous les processus anthropiques concourant à la production de la chaleur dans une logique de causalité fonctionnelle, incluant l'étape de production de la biomasse forestière. Pour cette dernière, les systèmes étudiés ont été considérés comme des systèmes anthropisés dont le principal objectif est la production de biomasse, impliquant que la biomasse produite est considérée comme un produit intermédiaire. Les processus du vivant de croissance, mortalité et décomposition de la biomasse en forêt, ont donc été inclus dans les frontières du système. Ils ont été représentés sous forme de différents compartiments de stockage de carbone, englobant la biomasse vivante et morte, aérienne et souterraine. Seuls les compartiments litière et sol au sens strict du terme n'ont pas été pris en compte par manque de données.

La Figure 1 fournit une représentation simplifiée des processus inclus dans les frontières des systèmes d'étude ainsi définies en approche attributionnelle.

Pour les scénarios sylvicoles ne produisant pas uniquement du bois à usage énergétique, l'affectation physique des impacts sur le contenu en carbone des bois récoltés a été retenue pour les calculs en approche attributionnelle. En revanche, en approche conséquentielle, la résolution de la multifonctionnalité doit se faire par élargissement du système (voir section 2.2.2 de la partie 1 du rapport sur l'état de l'art). Cet élargissement nécessitant de réaliser un travail spécifique hors du champ de l'étude, les calculs en approche conséquentielle n'ont pu être réalisés qu'uniquement lorsque les conséquences des évolutions se limitent à une surproduction de bois énergie sans changement sur la production des autres qualités de bois. Parmi les évolutions étudiées, seule celle concernant la récolte des TCR d'eucalyptus de bois fort à arbre entier a donc pu être étudiée en approche conséquentielle.

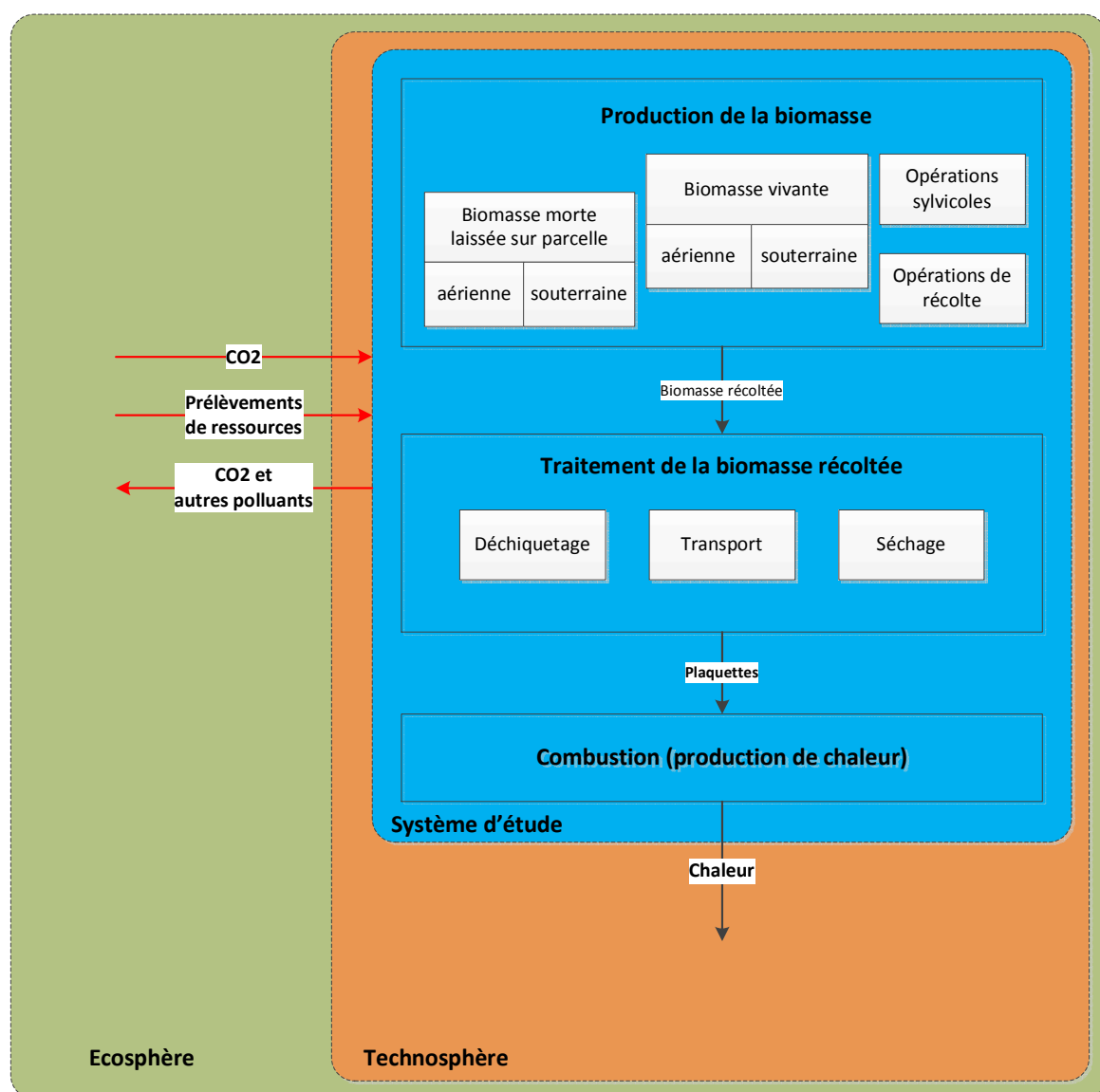


Figure 1 – Représentation simplifiée des systèmes d'étude et de ses interactions avec le reste du monde en approche attributionnelle



Par ailleurs, en approche conséquentielle, les liens de causalité liés à des logiques autres que fonctionnelles, tels que des réactions de marché, n'ont pas pu être déterminés de façon spécifique à l'évolution étudiée. Par défaut, les hypothèses définies dans la mise en œuvre de l'évaluation du « temps de retour GES » ont été prises, c'est-à-dire la substitution de l'énergie fossile par l'énergie biomasse supplémentaire produite, sans autres conséquences aussi bien au niveau de la production de l'énergie, que de la production de la biomasse.

### *Dimensions spatio-temporelles des systèmes d'étude*

La description des processus forestiers nécessite de choisir des dimensions spatio-temporelles de cet usage du sol. Chaque arbre est prélevé dans un peuplement d'une parcelle forestière, constituant la plus petite échelle spatiale de gestion, celle où s'observent des interactions biologiques entre les arbres. Par ailleurs, chaque parcelle s'inscrit dans un territoire forestier constitué d'un ensemble de parcelles, pouvant faire l'objet de différentes logiques de gestion, forestière, patrimoniale, économique.

Un peuplement, quelles que soient ses dimensions, peut être conduit de différentes manières, avec des arbres sensiblement du même âge (peuplement équié) ou à l'inverse d'âge différent (peuplement inéquié). A l'échelle d'un ensemble de parcelles, théoriquement la gestion forestière cherche à obtenir une distribution équilibrée en classe d'âge, cependant différentes distributions en classes d'âge peuvent être observées, dépendantes de nombreux paramètres.

Par ailleurs, la gestion d'un peuplement est réfléchi de façon cyclique, de son installation à son renouvellement, avec des durées de cycle variant de 20 à plus de 150 ans (dans le cadre de notre étude de 20 à 80 ans (voir tableau 1)), correspondant à la notion d'occupation du cadre conceptuel de prise en compte d'usage du sol en ACV développé par Mila i Canals (voir section 2.4 de la partie 1 du rapport sur l'état de l'art). Il est en revanche beaucoup plus complexe de décrire des logiques de gestion d'un ensemble de parcelles à l'échelle d'un territoire.

Enfin, cette description, indépendamment de ses dimensions spatio-temporelles, peut être réalisée de façon théorique pour une représentation générique ou à l'inverse spatialisée pour une représentation spécifique.

Suivant ces différents choix de description (parcelle versus ensemble de parcelles, cycle versus horizon fixé, théorique versus spatialisée), les éléments intéressant l'évaluation, c'est-à-dire les stocks de carbone biogénique et la productivité en bois, peuvent être décrits de façon très différente (voir Tableau 2). Chacune de ces approches présente des intérêts et inconvénients :

- La parcelle produisant la biomasse d'intérêt : cette approche permet de prendre en compte les interactions biologiques entre les arbres existant à l'échelle d'un peuplement, de déterminer un stock moyen et une productivité moyenne sur une révolution, représentatif également d'un ensemble de parcelles à l'équilibre, ainsi que de décrire des variations de stocks indépendantes de l'échelle spatiale considérée ; sa description sous la forme d'une succession d'occupations, nécessaire pour la prise en compte de l'usage du sol en ACV, est aisée ; en revanche, elle ne permet pas de tenir compte d'un déséquilibre dans la distribution des classes d'âge qui peut s'observer à l'échelle d'un territoire ;
- Un ensemble de parcelles produisant la biomasse d'intérêt : cette approche permet de tenir compte de la distribution des classes d'âge sur un territoire considéré, mais les résultats sont dépendants de l'échelle spatio-temporelle retenue et donc non généralisables ; par ailleurs avec cette approche, la description du système présente des difficultés supérieures à celles rencontrées avec l'approche à la parcelle, de façon générale et en particulier pour répondre au cadre conceptuel de la prise en compte de l'usage du sol en ACV décrite sous la forme d'une succession d'occupations.

Enfin, il faut noter que les bases de données ACV existantes sur la production de biomasse forestière (EcolInvent, FCBA) considèrent les processus à l'échelle de la parcelle sur la révolution.

<b>Echelle spatiale considérée</b>	<b>Stock de carbone/ha</b>	<b>Productivité de bois/ha/an</b>
Parcelle avec peuplement équié	Non dépendant de l'espace considéré Stock variable au cours du temps Stock moyen sur une révolution constant d'une révolution à une autre	Non dépendante de l'espace considéré Variable au cours du temps Productivité moyenne sur une révolution constante d'une révolution à une autre
Parcelle avec peuplement inéquié	Non dépendant de l'espace considéré Stock variable au cours du temps avec une variation inférieure au cas équié, voire pas de variation dans le cas d'un équilibre parfait Stock moyen sur une révolution constant d'une révolution à une autre	Non dépendante de l'espace considéré Variable au cours du temps avec une variation inférieure au cas équié, voire pas de variation dans le cas d'un équilibre parfait Productivité moyenne sur une révolution constante d'une révolution à une autre
Ensemble de parcelles avec une distribution des classes d'âge à l'équilibre	Pas d'évolution avec un stock identique au stock moyen d'une parcelle sur une révolution	Constante dans le temps avec une productivité identique à la productivité moyenne d'une parcelle sur une révolution
Ensemble de parcelles avec une distribution des classes d'âge non équilibré	Dépendant de l'espace considéré Stock variable au cours du temps, de façon différente aux variabilités observées à l'échelle de la parcelle Stock moyen sur une durée variable	Dépendante de l'espace considéré Productivité variable au cours du temps, de façon différente aux variabilités observées à l'échelle de la parcelle Productivité moyenne sur une durée variable

**Tableau 2 – Description des stocks de carbone en fonction de l'échelle spatiale considérée**

Dans le cadre des évaluations par ACV réalisées ici, les systèmes étudiés ont été décrits à la parcelle, au minimum sur la durée de révolution du scénario sylvicole, incluant l'ensemble des émissions et captations de gaz à effet de serre ainsi que l'ensemble du bois produit.

Pour l'application de certaines méthodes dynamiques, le choix de l'instant considéré pour commencer à décrire un scénario sylvicole est essentiel, et il est alors nécessaire de définir clairement les frontières temporelles pour un système et une occupation donnés. Dit autrement, cela nécessite d'allouer l'évolution dans le temps de la parcelle considérée, notamment en termes de variations de potentiel de séquestration de carbone, entre différents usages successifs. Pour cela, il est considéré dans nos cas d'étude de forêt de production qu'une occupation débute à la fin de la récolte finale de la précédente occupation. Ce principe est représenté à la Figure 2 suivante, pour trois cas distincts représentatifs des scénarios et des hypothèses des méthodes : usages successifs identiques, usages successifs incluant une régénération vers un usage de référence, et usages successifs incluant une transformation d'usage, d'un usage 1 vers un usage 1', représentée ici comme un raccourcissement de révolution.

En approche attributionnelle, cette affectation temporelle est suffisante pour décrire les frontières temporelles d'un système. Dans le cadre de cette approche, un système est donc considéré sur l'ensemble d'une occupation de l'itinéraire sylvicole, de la fin de la récolte finale de la précédente occupation à la fin de la récolte finale de l'occupation considérée, soit sur une révolution uniquement.

En approche conséquentielle, l'affectation temporelle n'est pas suffisante pour définir les frontières temporelles d'un système. En effet, dans le cadre de cette approche, le système étudié n'est plus uniquement centré sur le produit du système mais sur les conséquences de l'évolution d'un type de système vers un autre, qui inclut notamment des évolutions telles que des raccourcissements ou des allongements de révolution (voir Tableau 3). Comme vu dans l'état de l'art, ceci implique que le système étudié est défini par la comparaison entre une situation sans mise en œuvre de l'évolution de pratiques et une situation avec mise en œuvre de cette évolution. La Figure 2c illustre un tel cas, où l'évolution mise en œuvre est un raccourcissement de la durée de révolution. Si les frontières temporelles étaient limitées à la durée de révolution de la nouvelle occupation (Usage 1'), à l'instar de ce qui est fait en approche attributionnelle, ceci conduirait à deux difficultés dans la définition du système :

- Il y aurait une incohérence temporelle entre les occupations des deux situations comparées, celles-ci n'ayant pas les mêmes durées ; et
- Etudier les conséquences de l'évolution de pratiques sur la durée d'une seule occupation signifierait implicitement que l'évolution de pratiques ne serait effective que pour une seule occupation.

Afin de conserver une cohérence temporelle entre les deux situations comparées, si celles-ci ne convergent pas à un horizon donné (il pourrait par exemple être supposé qu'après un temps donné, la surface considérée soit artificialisée



quelle que soit la pratique), il n'est alors pas possible de définir de frontière temporelle supérieure. En théorie, en approche conséquentielle, les frontières temporelles du système sont alors définies de l'instant de la mise en œuvre de l'évolution de pratiques considérée à un temps infini ou un horizon de convergence entre les deux situations étudiées. En pratique, il pourra être vu en section 2.2 que ces frontières temporelles peuvent être restreintes à certains horizons, selon les hypothèses intrinsèques des méthodes de caractérisation.

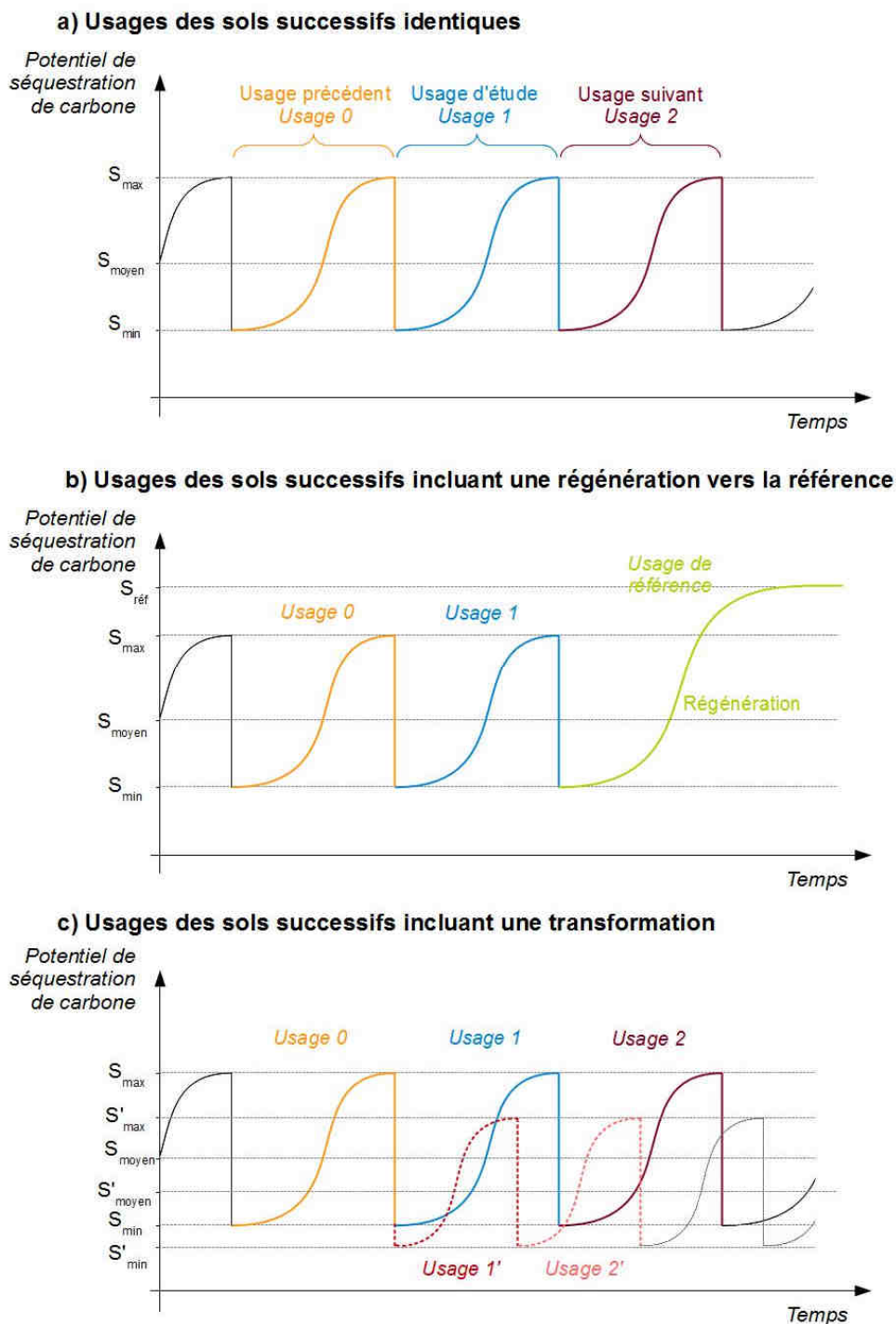


Figure 2 – Affectation temporelle des occupations dans trois cas d'usages successifs : a) usages successifs identiques, b) usages successifs incluant une régénération, et c) usages successifs incluant une transformation

## 2. Données et hypothèses

### 2.1. Relatives à la description des stocks de carbone de biomasse liés à l'usage des sols

#### Plantation de douglas

Trois itinéraires de plantation de douglas ont été retenus dans le cadre de l'étude. Les principales caractéristiques de ces itinéraires sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Itinéraire	D 80	D 60	D 40
Densité de plantation en nombre de plants/ha	1250	1250	1250
Age des éclaircies (taux de prélèvement en nombre de tiges)	20 ans (36%) 30 ans (36%) 40 ans (22%) 50 ans (49%)	20 ans (36%) 30 ans (36%) 40 ans (22%) 50 ans (49%)	20 ans (36%) 30 ans (36%)
Age de la coupe rase en année	80	60	40
Productivité moyenne calculée sur une révolution en tonne de C de bois commercialisé/ha/an	3,5	3,7	3,3
Productivité moyenne calculée sur 100 ans en tonne de C de bois commercialisé/ha/an	2,9	2,7	2,8
Stock moyen de carbone en tonne de C/ha	144	120	94

**Tableau 3 – Caractéristiques des itinéraires retenus de plantation de douglas**

Les données de croissance proviennent du modèle dendrométrique OASIS développé par FCBA (Cailly, 2014). Ce modèle fournit des résultats à chaque prélèvement de bois. Les volumes de biomasse sont exprimés en bois fort tige sous écorce. L'ensemble des compartiments de biomasse vivante a été modélisée sur la base des hypothèses complémentaires suivantes :

- Un taux moyen d'écorce de 13% ;
- Des facteurs d'expansion biomasse aérienne totale fonction du diamètre à 130 cm (1,33 à 20 ans, 1,27 à 30 ans, 1,22 à 40 ans, 1,18 à 50 ans et 1,14 à 60 ans) applicables sur le volume de bois fort tige (données FCBA établies dans le cadre du projet) ;
- Un facteur d'expansion biomasse souterraine applicable sur la biomasse aérienne totale de 1.208 (Ranger, 2001).

L'accroissement entre 2 interventions a été supposé constant.

La conversion du volume de biomasse en masse de carbone a été réalisée sur la base des hypothèses suivantes :

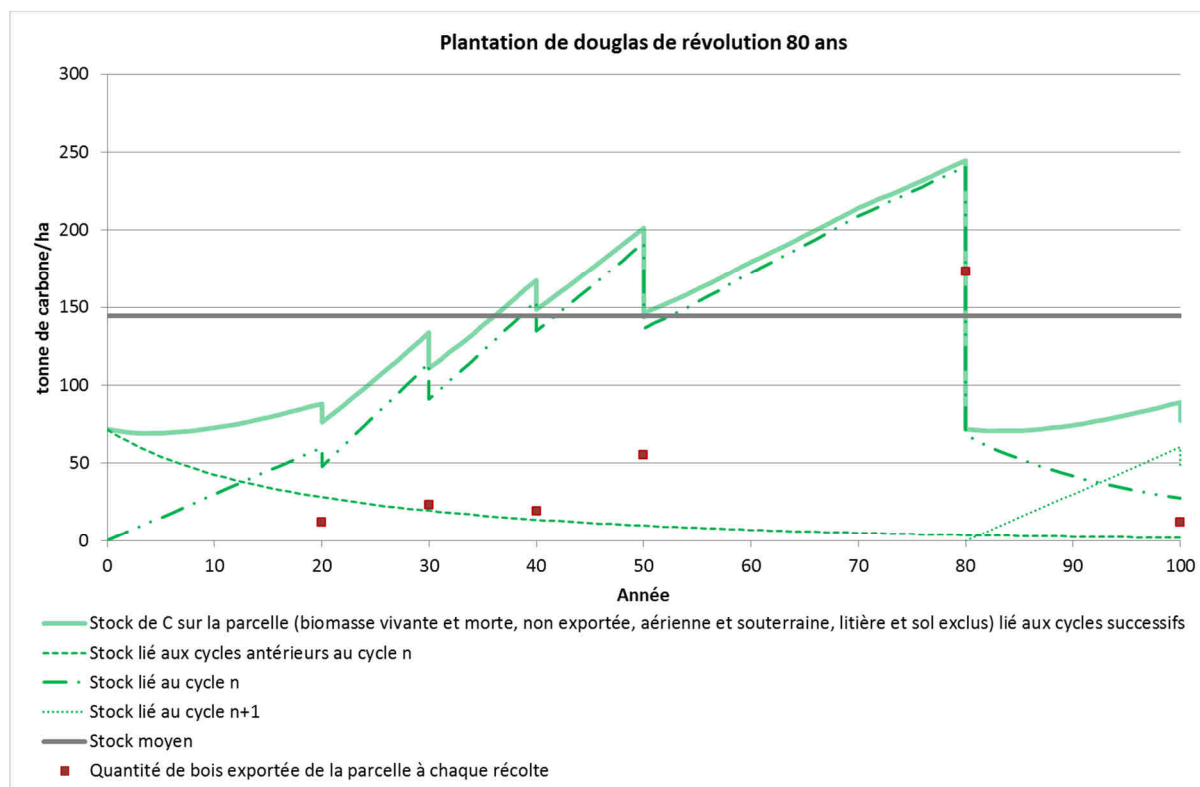
- Une siccité de la biomasse à l'état vert de 61% ;
- Une masse volumique de la biomasse à l'état vert de 613 kg/m<sup>3</sup> ;
- Un taux de carbone de la biomasse anhydre de 49,4%.

En ce qui concerne le compartiment de biomasse morte, il a été considéré que ce compartiment suivait une équation de décroissance exponentielle de première ordre  $Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau}$  avec  $\tau$  la durée de vie moyenne, prise à 8 ans pour les rémanents et à 30 ans pour les souches (Montes, 2006). La quantité en début de révolution de biomasse morte aérienne et celle de biomasse morte souterraine nécessaires à l'obtention d'un stock moyen stable d'une révolution à une autre ont été déterminées par calcul itératif.

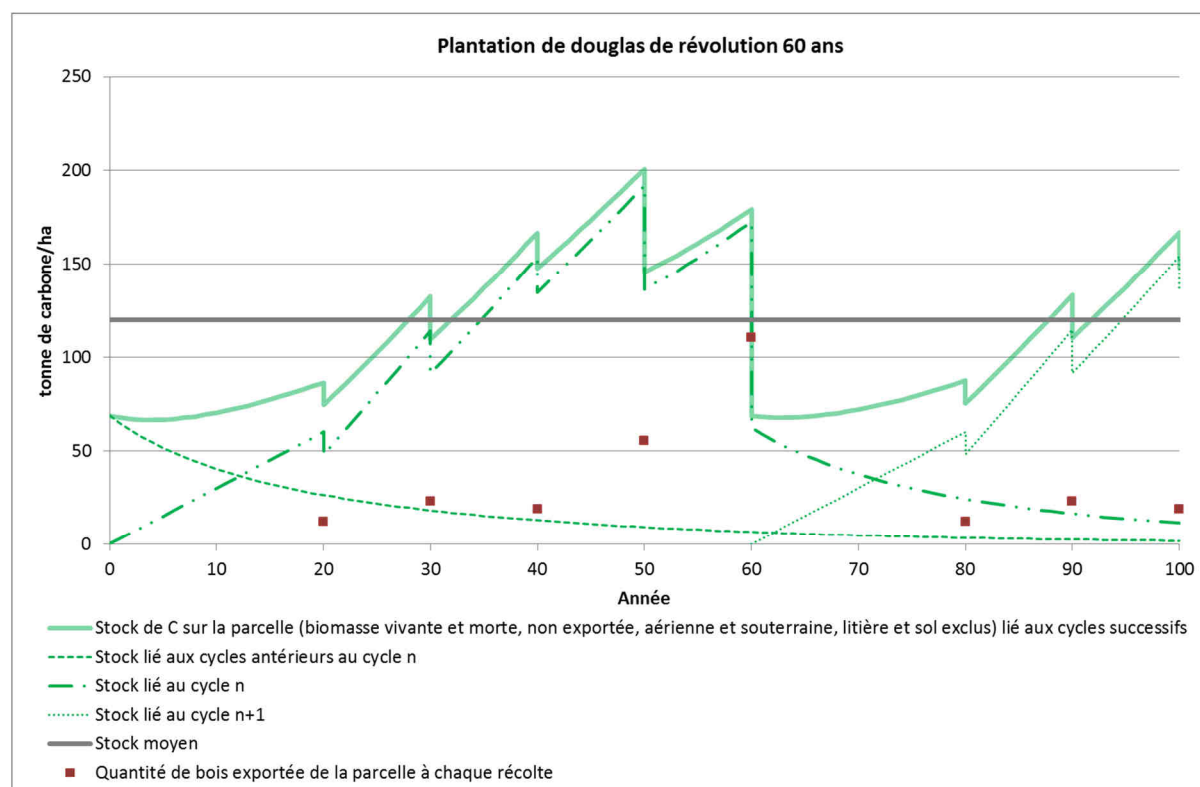
A partir de l'ensemble de ces données, l'évolution dans le temps, à l'échelle de la parcelle, du stock total de biomasse (vivante et morte, aérienne et souterraine) a été modélisée :

- Sur une révolution ;
- Sur la succession de plusieurs révolutions durant 100 ans.

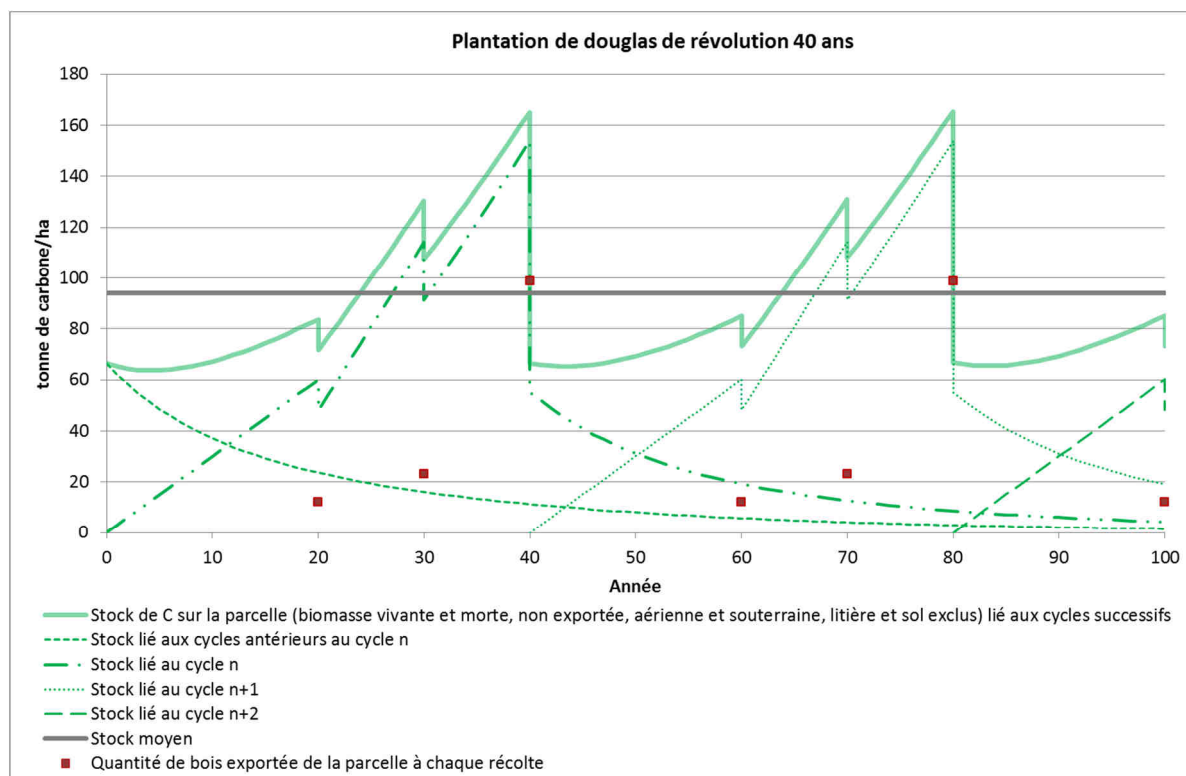
Il a été également calculé par intégration à partir de la modélisation liée à une révolution la quantité de carbone stockée en moyenne. Cette valeur peut être interprétée à la fois comme la valeur moyenne obtenue sur la succession à l'infini des révolutions, ou comme la valeur obtenue à l'échelle d'un peuplement de plusieurs parcelles qui formeraient un ensemble d'arbres équilibré en classe d'âge.



**Figure 3 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle de douglas de révolution 80 ans**



**Figure 4 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle de douglas de révolution 60 ans**



**Figure 5 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle de douglas de révolution 40 ans**

## TCR d'eucalyptus

Deux itinéraires de taillis à courte rotation (TCR) d'eucalyptus ont été retenus dans le cadre de l'étude. Les principales caractéristiques de ces itinéraires sont présentées dans le tableau ci-dessous et ne varient entre eux uniquement au niveau de la récolte, bois fort versus arbre entier.

Itinéraire de TCR d'eucalyptus	Récolte bois fort	Récolte arbre entier
Densité de plantation en nombre de plants/ha	1250	
Nombre de rotations	3	
Durée des rotations en année	10	
Productivité moyenne calculée sur une révolution en tonne de C de bois commercialisé/ha/an	5,5	6,6
Productivité moyenne calculée sur 100 ans en tonne de C de bois commercialisé/ha/an	5,4	6,5
Stock moyen de carbone en tonne de C/ha	73	64

**Tableau 4 – Caractéristiques des itinéraires retenus de TCR d'eucalyptus**

Les données de croissance proviennent d'un modèle dendrométrique développé par FCBA (Bouvet, 2013). Ce modèle fournit des productivités de 200 tonnes brutes en bois fort sur écorce/ha pour la première rotation et de 250 tonnes brutes/ha pour la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> rotation. La modélisation de l'ensemble des compartiments de biomasse vivante a été réalisée à partir des hypothèses complémentaires suivantes :

- Un facteur d'expansion biomasse aérienne totale applicable sur le volume de bois fort de 1.2 (Bouvet, 2013) ;
- Un facteur d'expansion biomasse souterraine applicable sur le volume de bois fort de 1.3 (Paixao, 2004).

L'accroissement de chaque rotation a été supposé constant.

La conversion du volume de biomasse en masse de carbone a été réalisée sur la base des hypothèses suivantes :

- Une siccité de la biomasse à l'état vert de 48% ;

- Une masse volumique de la biomasse à l'état vert de 1070 kg/m<sup>3</sup> ;
- Un taux de carbone de la biomasse anhydre de 49,4%.

En ce qui concerne le compartiment de biomasse morte, il a été considéré que ce compartiment suivait une équation de décroissance exponentielle de première ordre  $Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau}$  avec  $\tau$  la durée de vie moyenne, prise à 8 ans pour les rémanents et à 30 ans pour les souches (Montes, 2006). La quantité, en début de cycle, de biomasse morte aérienne et celle de biomasse morte souterraine nécessaires à l'obtention d'un stock moyen stable d'un cycle à un autre ont été déterminées par calcul itératif.

A partir de l'ensemble de ces données, l'évolution dans le temps, à l'échelle de la parcelle, du stock total de biomasse (vivante et morte, aérienne et souterraine) a été modélisée :

- Sur un cycle complet ;
- Sur la succession de plusieurs cycles durant 100 ans.

Il a été également calculé par intégration à partir de la modélisation liée à une révolution la quantité de carbone stockée en moyenne. Cette valeur peut être interprétée à la fois comme la valeur moyenne obtenue sur la succession à l'infini des révolutions, ou comme la valeur obtenue à l'échelle d'un peuplement de plusieurs parcelles qui formeraient un ensemble d'arbres équilibré en classe d'âge.

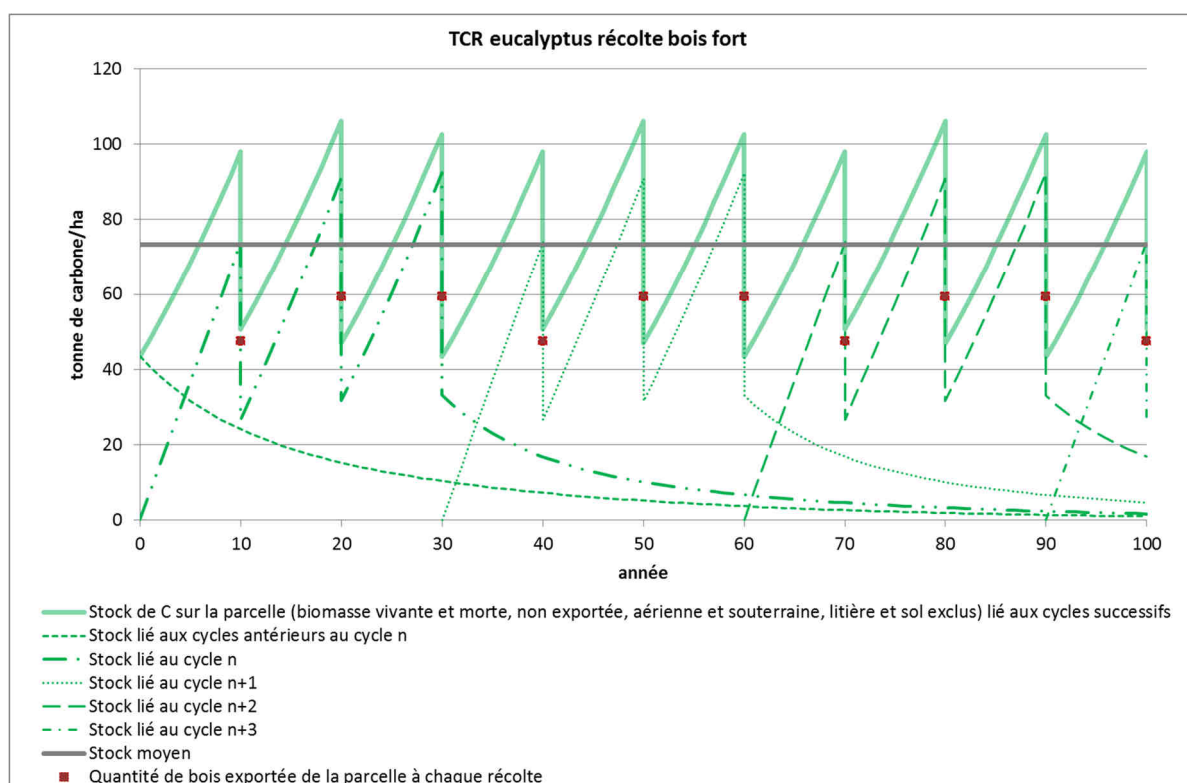


Figure 6 – Stocks de C et récolte du bois fort à l'échelle d'une parcelle de TCR d'eucalyptus

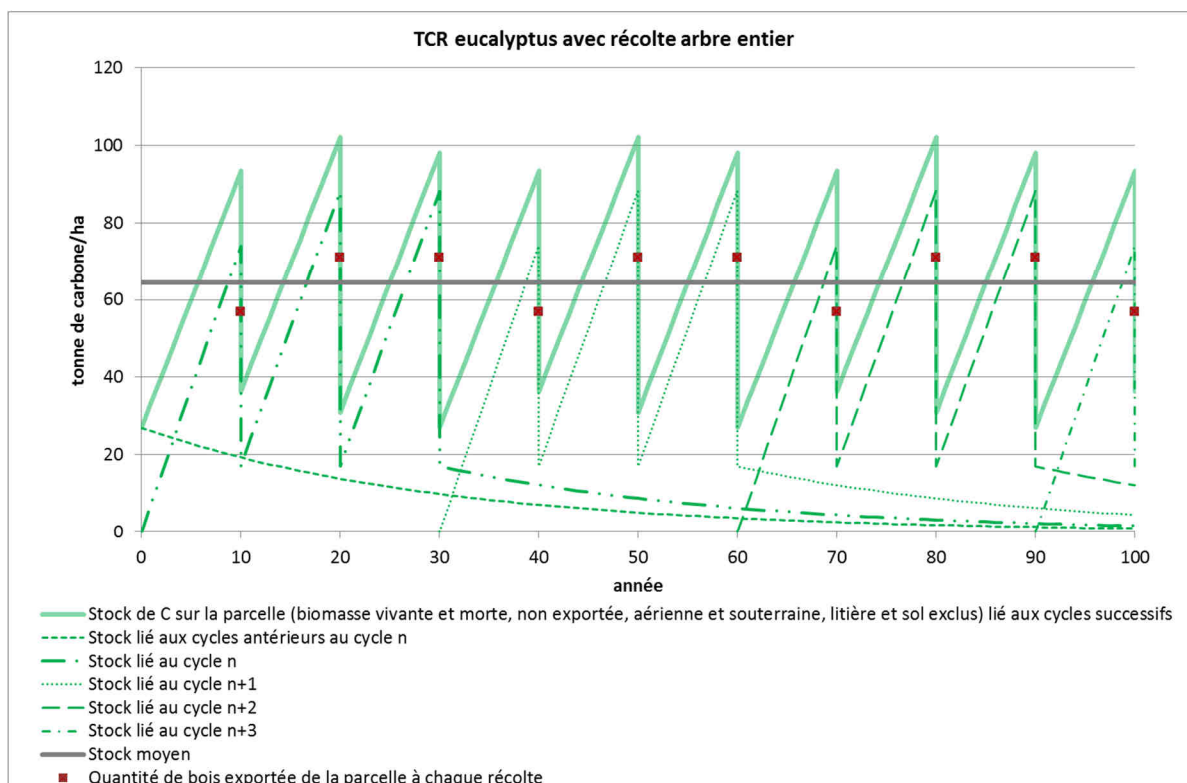


Figure 7 – Stocks de C et récolte de bois arbre entier à l'échelle d'une parcelle de TCR d'eucalyptus

## Taillis et futaie sur souche de châtaignier

Un taillis simple et une futaie sur souche de châtaignier ont été retenus dans le cadre de l'étude. Les principales caractéristiques de ces itinéraires sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Itinéraire	Taillis simple	Futaie sur souche
Age des éclaircies (taux de prélèvement en volume de bois fort tiges)	/	10 ans (63%) 16 ans (37%) 25 ans (33%)
Age de la coupe rase en année	20	45
Productivité moyenne calculée sur une révolution en tonne de C de bois commercialisé/ha/an	2,4	2,3
Productivité moyenne calculée sur 100 ans en tonne de C de bois commercialisé/ha/an	2,4	2,2
Stock moyen de carbone en tonne de C/ha	48	68

Tableau 5 – Caractéristiques des itinéraires retenus de châtaignier

Les données sur la croissance proviennent de modèles dendrométriques développés par le CNPF-IDF (Lemaire, 2008). A partir des résultats des modèles, il a été estimé :

- La quantité de biomasse aérienne en tonne sèche/ha sur la base d'équations allométriques (Sabatier-Tarrago, 1989) ;
- La quantité de biomasse souterraine en tonne sèche/ha sur la base d'équations allométriques (Cairns, 1997).

Les volumes de bois récolté fournis en bois fort tige sur écorce ont été convertis en tonnes de matière sèche sur la base des hypothèses suivantes :

- Une siccité de la biomasse à l'état vert de 56% ;



- Une masse volumique de la biomasse à l'état vert de 888 kg/m<sup>3</sup>.

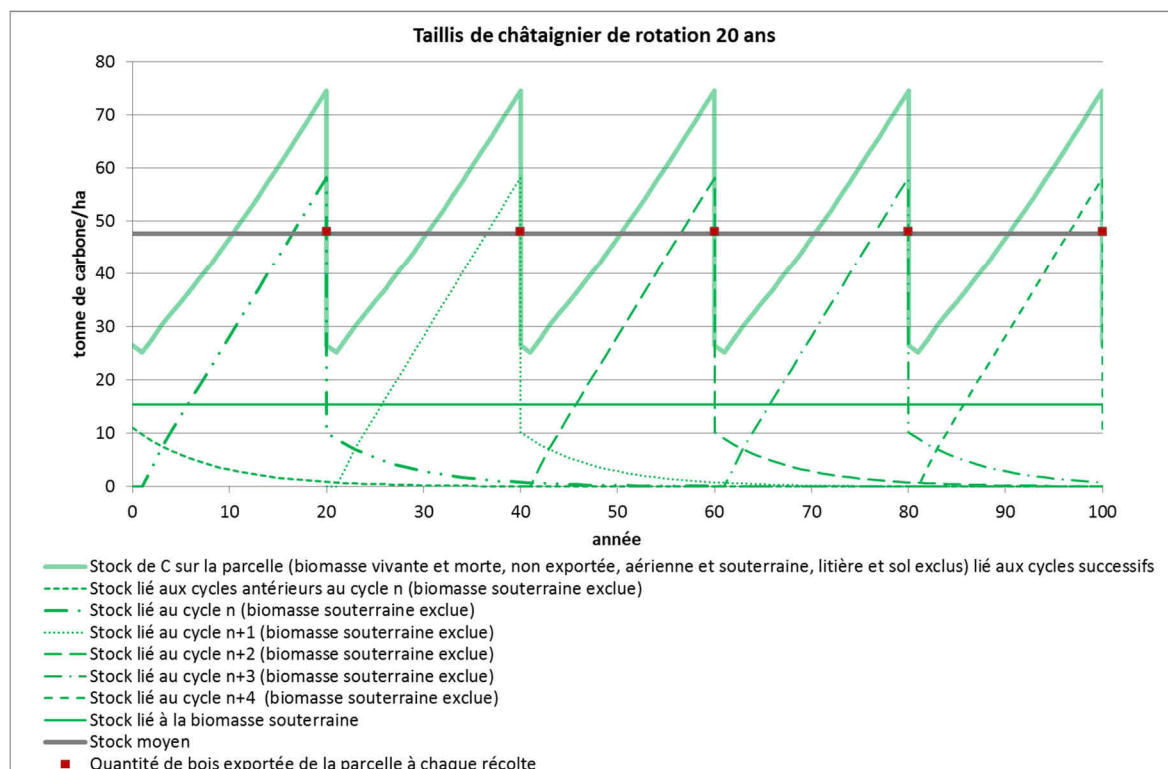
La conversion de la tonne sèche de biomasse en masse de carbone a été réalisée sur la base de l'hypothèse de 49,4% de taux de carbone de la biomasse anhydre.

En ce qui concerne le compartiment de biomasse morte, il a été considéré que ce compartiment suivait une équation de décroissance exponentielle de première ordre  $Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau}$  avec  $\tau$  la durée de vie moyenne, prise à 8 ans pour les rémanents (Montes, 2006). Il faut noter que pour ces itinéraires faisant appel à de la régénération sur souche, il a été considéré que l'ensemble des souches restaient vivantes au cours du temps. La quantité, en début de cycle, de biomasse morte nécessaire à l'obtention d'un stock moyen stable d'un cycle à un autre a été déterminée par calcul itératif.

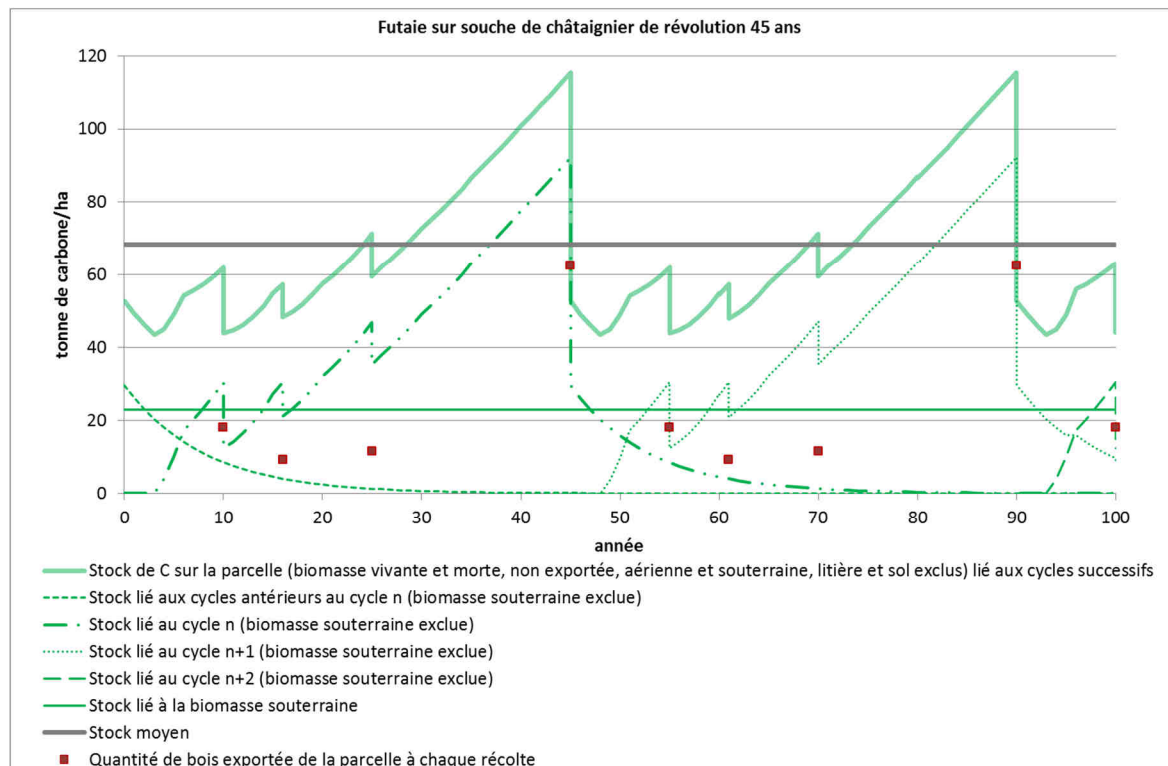
A partir de l'ensemble de ces données, l'évolution dans le temps, à l'échelle de la parcelle, du stock total de biomasse (vivante et morte, aérienne et souterraine) a été modélisée :

- Sur une révolution ;
- Sur la succession de plusieurs révolutions durant 100 ans.

Il a été également calculé par intégration à partir de la modélisation liée à une révolution la quantité de carbone stockée en moyenne. Cette valeur peut être interprétée à la fois comme la valeur moyenne obtenue sur la succession à l'infini des révolutions, ou comme la valeur obtenue à l'échelle d'un peuplement de plusieurs parcelles qui formeraient un ensemble d'arbres équilibré en classe d'âge.



**Figure 8 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle d'un taillis simple de châtaignier de rotation 20 ans avec l'hypothèse  $t_0$ =boisement**



**Figure 9 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle d'une futaie sur souche de châtaignier de révolution 45 ans**

## Occupation naturelle

Les méthodes découlant du cadre conceptuel d'usage des sols en ACV font appel dans l'établissement des facteurs de caractérisation à un usage de référence défini comme celui en l'absence de l'homme. Il a été donc nécessaire de qualifier cet usage de référence pour nos cas d'étude. Cette occupation dite naturelle dépend de nombreux facteurs écologiques, pédoclimatiques, historiques. Dans nos cas d'étude localisés en France, le scénario de boisements spontanés est celui le plus probable. En revanche ce boisement spontané peut prendre différentes formes et dynamiques, en fonction notamment :

- Des conditions du milieu (nature du sol, topographie, climat) ;
- De l'utilisation antérieure ;
- Des conditions d'abandon et l'état de la végétation en place ;
- De l'environnement végétal et de la faune sauvage.

Afin de ne pas démultiplier les calculs, il a été considéré un scénario moyen unique défini de la succession végétale suivante :

- 1<sup>er</sup> stade : colonisation naturelle par du bouleau, essence pionnière (colonisatrice de terrains nus), à raison d'un accroissement biologique moyen de 3 m<sup>3</sup>/ha/an et d'un volume maximal fixé à 150 m<sup>3</sup>/ha en bois fort tige ;
- 2<sup>ème</sup> stade : apparition du chêne à partir de la 80<sup>ème</sup> année dans le peuplement de bouleau, à raison d'un accroissement biologique moyen de 2,5 m<sup>3</sup>/ha/an et d'un volume maximal fixé à 300 m<sup>3</sup>/ha en bois fort tige ;
- 3<sup>ème</sup> stade : disparition totale du bouleau à la 100<sup>ème</sup> année.

Sur la base de ce scénario, la dynamique des stocks de carbone a été modélisée à partir du modèle en « S » adopté dans les travaux de Cherubini (Cherubini, 2011) et sur la base des hypothèses suivantes :

- Une siccité de la biomasse à l'état vert de 56% ;
- Une masse volumique de la biomasse à l'état vert pour le bouleau de 933 kg/m<sup>3</sup> ;
- Une masse volumique de la biomasse à l'état vert pour le chêne de 1000 kg/m<sup>3</sup> ;
- Un facteur d'expansion biomasse aérienne totale applicable sur le volume de bois fort de 1,45 (base de données EMERGE) ;



- Un facteur d'expansion biomasse souterraine applicable sur le volume de bois fort de 1,28 (base de données EMERGE) ;
- Un taux de carbone de la biomasse anhydre de 49,4% ;
- La biomasse morte se décompose suivant une équation de décroissance exponentielle de première ordre  $Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau}$  avec  $\tau$  la durée de vie moyenne prise à 24 ans (moyenne à partir d'une durée de vie moyenne de 8 ans pour les menus bois et de 30 ans le reste, pondérée par la part que représentent les différents compartiments).

Par ailleurs, afin d'analyser la sensibilité sur le type de modélisation, la dynamique de ce scénario a été également approximée de façon linéaire (voir section 3.4).

Sur la base de ces hypothèses, cette succession d'accrus naturels mettrait 200 ans à atteindre un stock potentiellement maximal de 153 tC /ha.

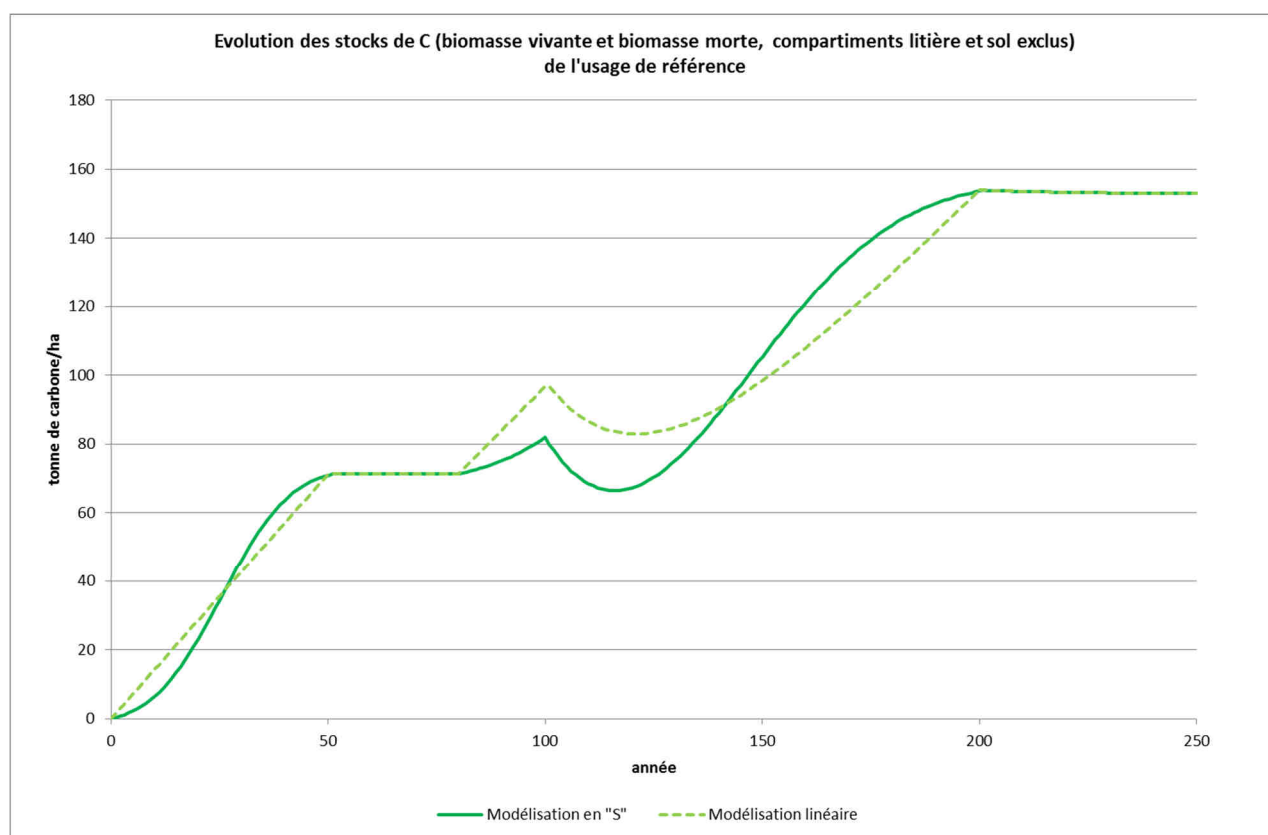


Figure 10 – Représentation de la dynamique du boisement naturel considéré comme usage de référence

## Usage agricole

Dans le cas de l'eucalyptus, un des scénarios retenus considère un changement d'affectation des sols, d'un usage agricole annuel vers un TCR. Afin de déterminer le stock de carbone au sein de la biomasse vivante d'un tel usage agricole, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été posées :

- L'usage agricole annuel a été assimilé à une culture de blé tendre ;
- A l'exception du moment de la récolte, aucun stade de sol nu n'a été considéré au cours d'une année ;
- En lien avec l'hypothèse précédente, la croissance du blé a été supposée se dérouler au cours d'une année entière, et ce de façon linéaire ; et
- Afin de simplifier la collecte de données, la biomasse vivante a été assimilée à la quantité de biomasse récoltée (grains) ou pouvant être récoltée (pailles), négligeant donc le chaume et les racines.

En termes de données, il a été considéré des rendements représentatifs de la France métropolitaine, soit 7,5 t / ha pour le grain et 6 t / ha pour la paille. Afin de déterminer le contenu carbone de ces deux constituants, leurs caractéristiques ont été estimées à partir de la base de données Phyllis<sup>1</sup>, par moyenne des valeurs disponibles dans la base, soit :

- Une humidité sur brut de 7 % pour le grain et de 10 % pour la paille ;
- Une teneur massique en cendres de 4,3 % pour le grain, et de 6,4 % pour la paille ; et
- Une teneur massique en carbone de 47,5 % pour le grain, et de 48,9 % pour la paille.

Ces hypothèses permettent alors de déterminer un stock maximal, au moment de la récolte, de 5,6 tC / ha, dont 56 % est lié au grain et 44 % à la paille. Le stock de carbone étant supposé évoluer linéairement d'une valeur nulle (sol nu) à ce stock maximal, le stock moyen de carbone de l'usage agricole est évalué à 2,8 tC / ha.

## 2.2. Autres données et hypothèses

### Relatives aux émissions de GES biomasses liées à la combustion de la biomasse en chaudière

L'estimation des émissions biogéniques de GES au niveau de l'étape de combustion de la biomasse en chaudière a été réalisée sur la base des hypothèses suivantes :

- Les émissions de GES se font sous la forme de CO<sub>2</sub> ;
- La combustion est complète, permettant de déterminer les émissions de CO<sub>2</sub> à partir du contenu en carbone des plaquettes ;
- Le taux de carbone de la biomasse anhydre est de 49,4% ;
- La siccité des plaquettes est fixée à 75% ;
- Le PCI à 75% de siccité est de 13,2 MJ/kg ; et
- Le rendement de la chaudière est de 85%.

### Relatives aux émissions de GES fossiles liées à la production de la chaleur à partir de biomasse

Le bilan des émissions de GES d'origine fossile de la production de chaleur à partir de bois peut varier en fonction de nombreux paramètres tels que :

- L'itinéraire sylvicole et les machines forestières utilisées ;
- La nature des transports et les distances parcourues ;
- Le traitement de la biomasse ;
- Le type de chaudière.

Cependant dans le cadre de ces analyses de sensibilité ce bilan a été fixé à une valeur moyenne de 5 kg de CO<sub>2</sub> équivalent par GJ de chaleur produite, afin de ne pas avoir l'influence de ce paramètre selon les scénarios étudiés dans le bilan global additionnant les impacts des émissions de GES fossiles à ceux du carbone biogénique.

### Relatives aux émissions de GES fossiles liées à la production de la chaleur à partir de gaz naturel

Le bilan des émissions de GES d'origine fossile de la production de chaleur à partir de gaz naturel a été établi à partir du processus pour la mise à disposition du gaz « Natural gas, high pressure, at consumer/FR » et celui pour la combustion « Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/FR » de la base ecoinvent V2. Ce bilan s'élève à 72 kg CO<sub>2</sub> équivalent/GJ.

<sup>1</sup> Base de données disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://www.ecn.nl/phyllis2/>. Dernier accès le 23/07/2015.

## 2.3. Relatives aux méthodes

Pour faciliter la compréhension de cette section, il est conseillé de se référer à la description des méthodes fournie dans la section 3 de la partie 1 du rapport sur l'état de l'art.

### « Comptabilité totale avec PRG »

L'émission négative de CO<sub>2</sub> associée à la captation de CO<sub>2</sub> lors de la croissance de la biomasse récoltée a été calculée sur la base du contenu en carbone de la biomasse. Aucune autre émission négative ou positive en lien avec l'étape de production de la biomasse n'a été comptabilisée.

Cette méthode peut également permettre de mesurer des variations de stock de carbone de l'occupation du sol en les assimilant à des flux vis-à-vis de l'atmosphère. Cependant en approche attributionnelle avec les frontières spatio-temporelles définies à la parcelle sur une révolution, les variations sont nulles. Il en est de même en approche conséquentielle pour laquelle l'horizon temporel est l'infini. Les variations de stock associées à des transformations d'usage ne sont pas considérées par cette méthode.

### « Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps »

L'application de l'ACV dynamique à des systèmes de production de chaleur à partir de biomasse ligneuse nécessite d'une part de fixer un horizon temporel dans l'évaluation, ici pris à 100 ans, et d'autre part de décrire l'étape de production de la biomasse en définissant un point de départ et une fin, ainsi que de déterminer où se situe le point à  $t_0$  dans le cycle de vie étudié.

Dans nos cas d'étude de production de la biomasse, il a été considéré que cette étape démarrait au reboisement de la parcelle et non à sa récolte, considérant que l'objectif premier de ces boisements est la production de biomasse et donc que sans cet objectif ces boisements n'existeraient pas (voir également section 1.2). Si le sylviculteur plante ou stimule la régénération naturelle, et intervient sur les peuplements de manière soustractive et sélective afin de favoriser le développement des arbres maintenus, c'est pour pouvoir vendre du bois. La récolte est le fruit de l'investissement fait au préalable. Il faut noter cependant que pour le cas de la production de biomasse à partir de taillis simple de châtaignier, l'hypothèse inverse aurait pu également être prise sachant que cet itinéraire sylvicole ne suscite aucune intervention de l'homme. La sensibilité des résultats à cette hypothèse pour ce scénario a été étudiée dans la section 3.2 (Figure 40).

Par ailleurs, le  $t_0$  a été placé au démarrage du cycle c'est-à-dire au départ du reboisement, correspondant à une production de chaleur qui aura lieu dans les années à venir. Il faut noter qu'il aurait été également possible de prendre l'hypothèse inverse en plaçant le  $t_0$  à la fin du cycle, c'est-à-dire à la production de chaleur à partir de la récolte finale, nécessitant alors d'établir des PRG ajustés dans le temps sur plus de 100 ans (100 + la durée du cycle complet) avec un bilan se rapportant à une production de chaleur ayant lieu en partie dans le passé. Cette dernière solution moins conventionnelle n'a pas été mise en œuvre dans le cadre de l'étude.

Enfin, la biomasse morte provenant des cycles antérieurs encore présente à  $t_0$  a été comptabilisée dans le stock total dans le cadre de cette méthode d'ACV dynamique, à la différence de la méthode Projet pour laquelle une affectation des biomasses aux différents cycles a été réalisée suivant leur origine.

Les occupations étudiées sont décrites en partant d'un stock de biomasse morte qui varie d'une occupation à une autre. Ainsi entre deux occupations consécutives différentes, la méthode mesure à la fois des effets d'occupation et des effets de transformation. Afin de pouvoir isoler ces deux effets pour présenter les résultats selon les résultats obtenus avec les méthodes d'usage du sol, il a été considéré les hypothèses suivantes :

- L'effet d'occupation est le même que celui évalué lorsque le système est à l'équilibre, sans transformation ; et
- L'effet de transformation est obtenu par différence, en soustrayant l'effet d'occupation à l'effet global évalué.

### « Conversion ILCD »

La mise en œuvre de cette méthode dans nos cas d'étude ne nécessite aucune hypothèse particulière.

## Méthode d'usage du sol Müller-Wenk

Le principe général de la méthode d'usage du sol Müller-Wenk est rappelé schématiquement à la Figure 11 suivante.

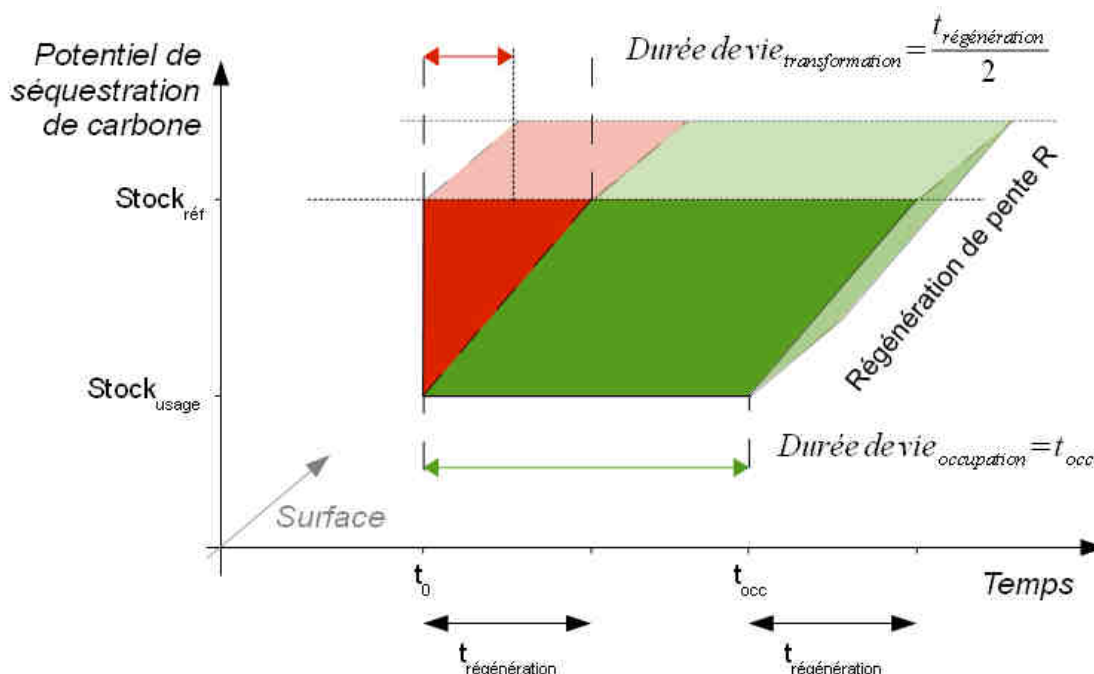


Figure 11 – Adaptation du cadre conceptuel de l'usage du sol pour l'évaluation de ses impacts sur le changement climatique, dans le cadre de la méthode d'usage du sol Müller-Wenk

Le calcul des facteurs de caractérisation de la méthode est rappelé aux équations (1) et (2), où  $\Delta S$  est la différence de potentiel de séquestration entre l'usage étudié et l'usage de référence,  $t_{\text{régénération}}$  est la durée de régénération vers l'usage de référence depuis l'usage étudié, et  $D_{\text{fossile}}$ , la durée de vie moyenne du  $\text{CO}_2$  fossile dans l'atmosphère, définie à 157 ans.

$$FC_{\text{occupation pendant 1 an}} = \frac{44}{12} \cdot \Delta S \cdot \frac{1}{D_{\text{fossile}}} \quad (1)$$

$$FC_{\text{transformation}} = \frac{44}{12} \cdot \Delta S \cdot \frac{t_{\text{régénération}}}{2 D_{\text{fossile}}} \quad (2)$$

Le facteur de caractérisation de transformation d'un usage A vers un usage B peut être obtenu par l'équation (3) suivante.

$$\begin{aligned} FC_{\text{transformation de A vers B}} &= FC_{\text{transformation de A vers référence}} + FC_{\text{transformation de référence vers B}} \\ &= -FC_{\text{transformation de référence vers A}} + FC_{\text{transformation de référence vers B}} \\ &= -\frac{44}{12} \cdot \Delta S_A \cdot \frac{t_{\text{régénération,A}}}{2 D_{\text{fossile}}} + \frac{44}{12} \cdot \Delta S_B \cdot \frac{t_{\text{régénération,B}}}{2 D_{\text{fossile}}} \end{aligned} \quad (3)$$

Pour les cas d'étude développés ici, le temps de régénération d'un usage forestier vers l'usage de référence est supposé identique quels que soient l'espèce forestière et le type de pratique considérés, soit 200 ans (voir section 2.1). L'équation (3) peut donc exprimée de façon simplifiée par l'équation (4) suivante, où  $S_A$  et  $S_B$  sont respectivement les stocks moyens caractéristiques des usages A et B.

$$\begin{aligned} FC_{\text{transformation de A vers B}} &= \frac{44}{12} \cdot \frac{t_{\text{régénération}}}{2 D_{\text{fossile}}} (\Delta S_B - \Delta S_A) \\ &= \frac{44}{12} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{200 \text{ ans}}{157 \text{ ans}} (S_A - S_B) \end{aligned} \quad (4)$$

## Méthode d'usage des sols projet

Le principe général de la méthode d'usage des sols projet est rappelé à la Figure 12.

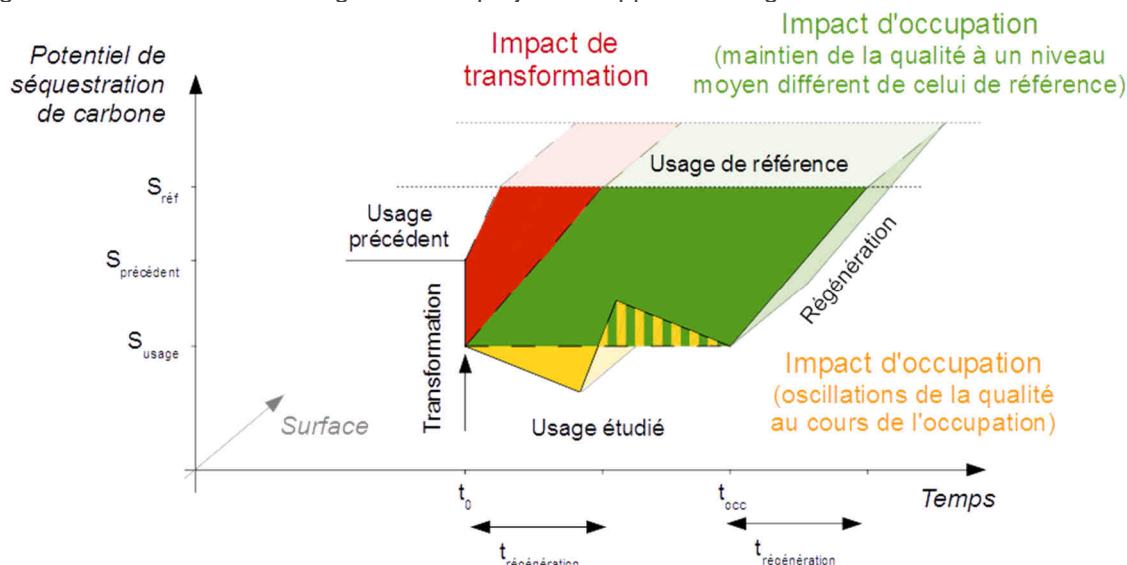


Figure 12 – Adaptation du cadre conceptuel de l'usage du sol pour l'évaluation de ses impacts sur le changement climatique, dans le cadre de la méthode d'usage du sol projet

Le principe de détermination des profils nets de transformation et d'occupation sont également rappelés schématiquement aux Figure 13 et Figure 14, respectivement.

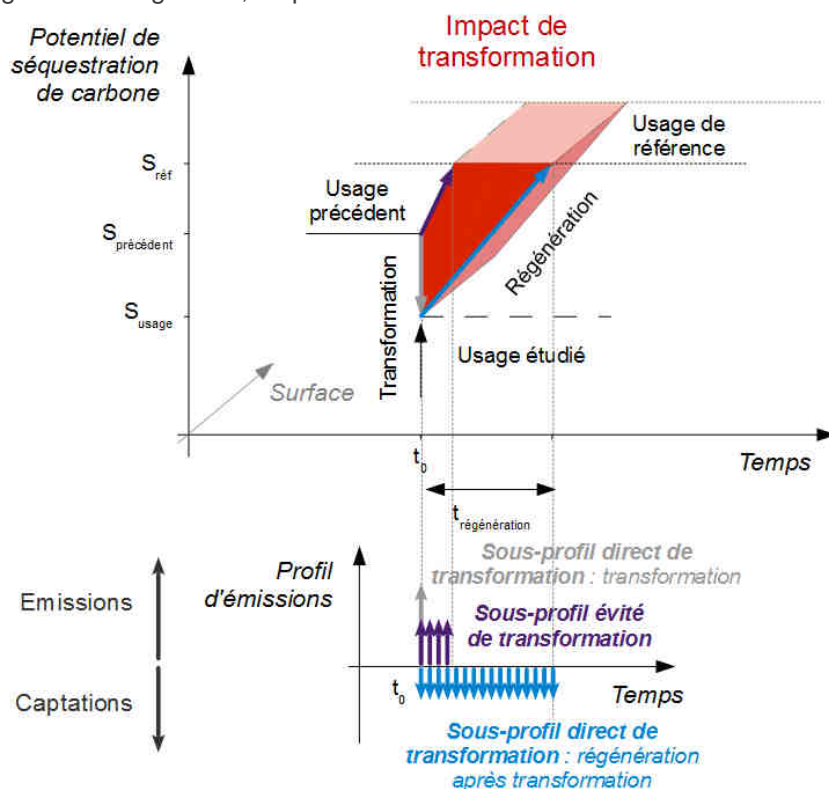


Figure 13 – Obtention du profil net d'émissions d'une transformation d'usage du sol, dans le cadre de la méthode d'usage du sol projet

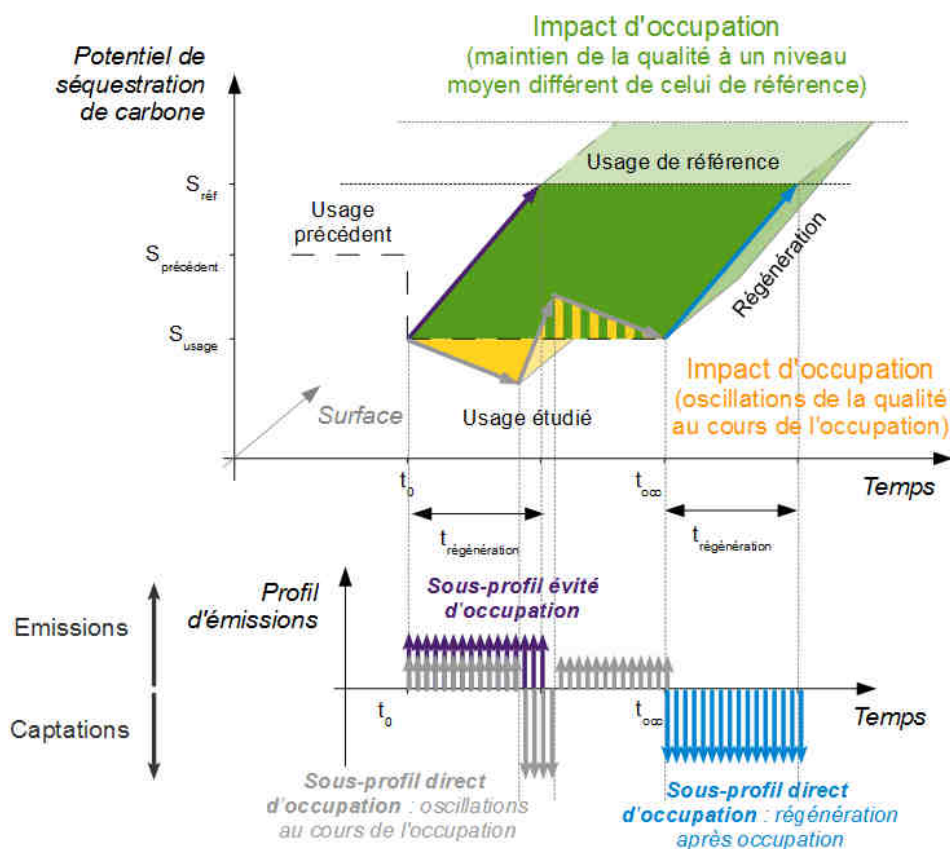


Figure 14 – Obtention du profil net d'émissions d'une occupation de sol, dans le cadre de la méthode d'usage du sol projet

En combinant les représentations schématiques générales des Figure 13 et Figure 14, avec la représentation d'une occupation et d'une transformation des sols donnée en Figure 2, il est possible de décliner le cadre général de cette méthode selon les dynamiques et stocks considérés ici. Ceci permet d'obtenir de nouvelles représentations schématiques, données en Figure 15 et Figure 16, pour les impacts de transformation et d'occupation, respectivement.

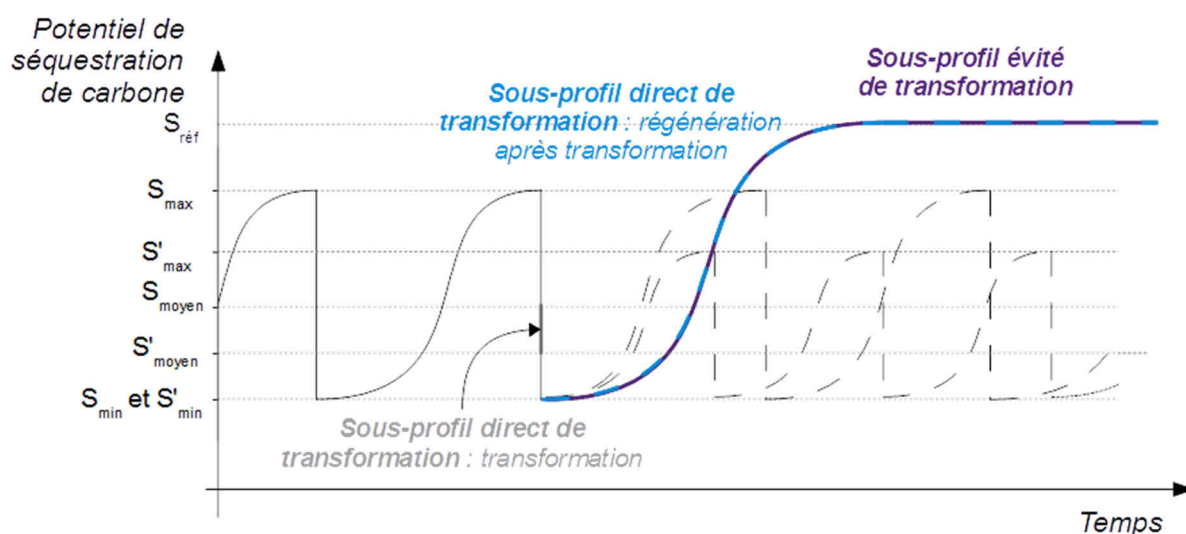


Figure 15 – Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage du sol projet pour la prise en compte de l'impact de transformation, en approche attributionnelle : cas sans différence dans le stock de biomasse morte



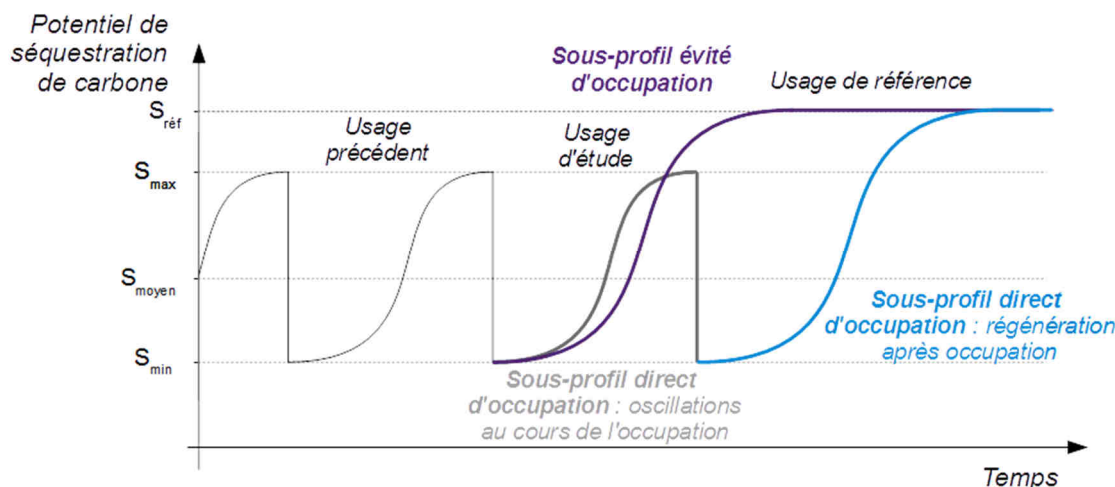


Figure 16 – Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage du sol projet pour la prise en compte de l'impact d'occupation, en approche attributionnelle

Dans le cas de l'impact de transformation (Figure 15) et de la représentation choisie ici pour le processus de régénération, le sous-profil direct de transformation et le sous-profil évité de transformation se compensent exactement. Le profil net de transformation se réduit alors à la différence de stocks moyens.

Toutefois, il peut exister une différence entre les deux représentations du processus de régénération, liée à la quantité de biomasse morte présente sur la parcelle au moment de la transformation. Dans un tel cas, la représentation de la Figure 16 précédente évolue selon celle de la Figure 17 suivante. Les deux sous-profils évité et direct de transformation ne se compensent alors que lorsqu'il n'y a plus de différence dans les stocks de biomasse morte.

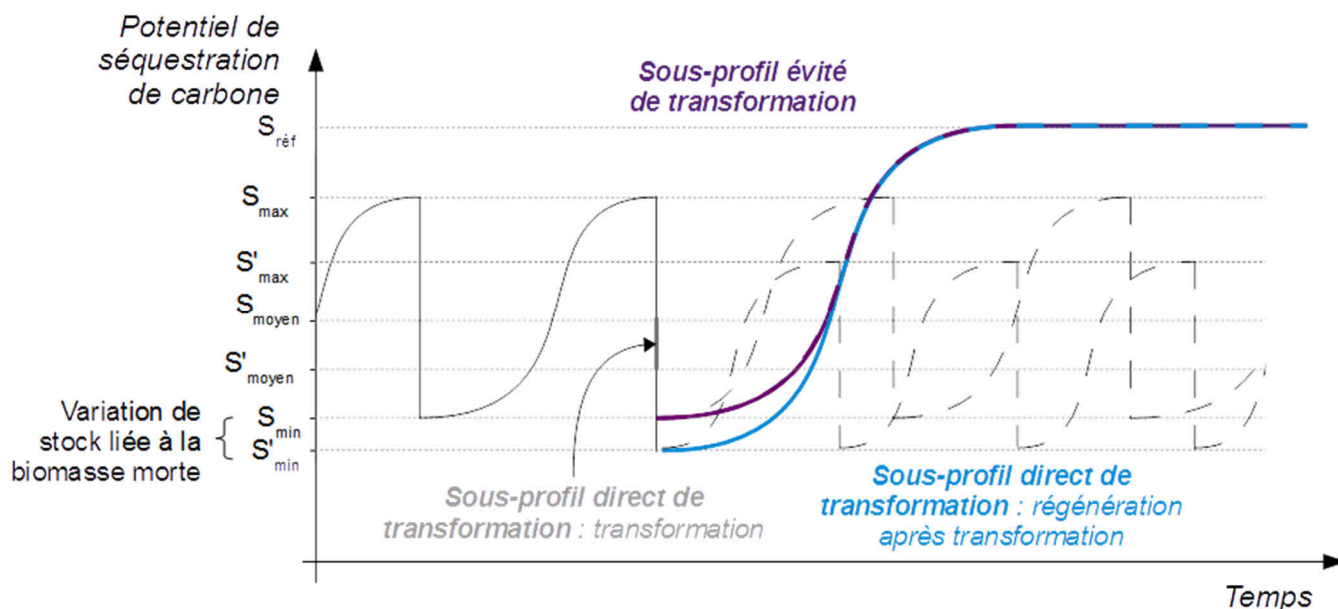


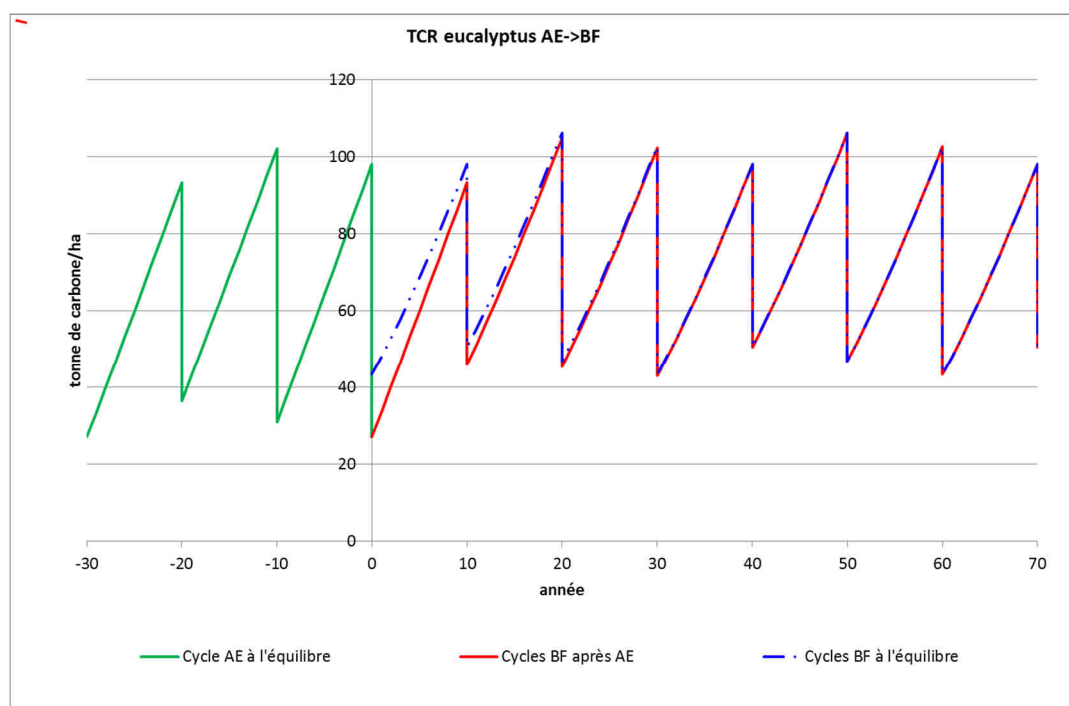
Figure 17 - Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage du sol projet pour la prise en compte de l'impact de transformation, en approche attributionnelle : cas avec différence dans le stock de biomasse morte

La traduction de cet effet en impact a alors été réalisée de façon différente selon le cas rencontré :

- Au moment de la transformation, si le stock de biomasse morte de l'usage précédent est supérieur à celui de l'usage d'étude ( $S_{\min} > S'_{\min}$ ), cette différence, liée à la présence de biomasse morte sur la parcelle due à l'usage précédent, est allouée à cet usage précédent ; pour le calcul de l'impact de transformation, cette différence n'est alors pas prise en compte, car attribuable à un usage réel ;

- Au moment de la transformation, si le stock de biomasse morte de l'usage précédent est inférieur à celui de l'usage d'étude ( $S_{\min} < S'_{\min}$ ), cette différence est due à une absence de biomasse morte, qui serait présente sur l'usage d'étude à l'équilibre ; cette différence n'est alors pas attribuable à un usage réel et est alors prise en compte dans le calcul de l'impact de transformation : elle correspond à un retard dans l'évolution du stock moyen vers son niveau d'équilibre.

En effet, cette dernière possibilité est représentée à la Figure 18 dans un cas réel : l'évolution d'une récolte de TCR d'eucalyptus d'arbre entier à bois fort. Par souci de simplicité, les processus de régénération ne sont pas représentés. La courbe verte représente alors l'évolution du stock de carbone lors de l'usage précédent, la courbe rouge lors de l'usage d'étude, et la courbe bleue lors d'un cas hypothétique où l'usage d'étude est à l'équilibre dès l'instant de transformation. L'effet pris en compte dans le calcul de l'impact de transformation peut alors être vu comme la différence entre les courbes rouge et bleue, qui correspond bien à un retard dans le retour à l'équilibre.



**Figure 18 – Illustration de l'effet de transition par le scénario évolution de la récolte d'arbre entier à bois fort du TCR d'eucalyptus**

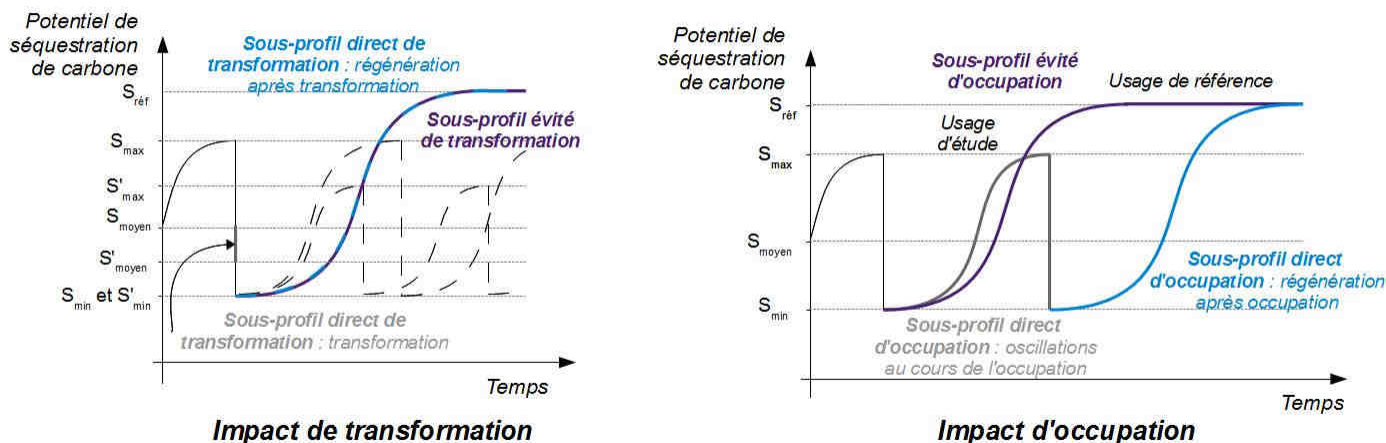
#### Remarque 1 : Choix de description des profils d'émissions

En accord avec les principes retenus pour l'affectation d'usages du sol (voir section 1.2), les sous-profils d'émissions sont décrits à partir de la fin de la récolte finale de l'usage précédent, soit à partir de la valeur de stock  $S_{\min}$ . Toutefois, puisque les usages sont caractérisés par leur potentiel moyen de séquestration, il aurait également pu être choisi de décrire ces profils à partir du stock moyen  $S_{\text{moyen}}$ . Les implications d'une telle hypothèse alternative, par rapport à l'hypothèse retenue représentée aux Figure 15 et Figure 16, est illustrée en Figure 19. Par souci de simplification, cette figure représente un cas où il n'y a pas de différence entre les stocks minimaux des deux usages précédent et d'étude.

La Figure 19 montre que l'hypothèse alternative, du fait de compensations ou de réajustements de profils, conduit à la même détermination de l'impact d'occupation que dans le cas de l'hypothèse retenue. Concernant l'impact de transformation, dans le cas de l'hypothèse alternative, l'ensemble du sous-profil direct est identique au sous-profil évité ; l'un étant compté négativement et l'autre positivement, il vient que l'impact de transformation calculé dans ce cas serait toujours nul. Ce résultat, non satisfaisant, confirme qu'il est bien a priori plus pertinent de décrire le profil d'un usage selon l'affectation réalisée entre usages successifs, soit à partir de la fin de la récolte précédente et non à partir du stock moyen.



### Hypothèse retenue : description des profils à partir de $S_{\min}$



### Hypothèse alternative : description des profils à partir de $S_{\text{moyen}}$

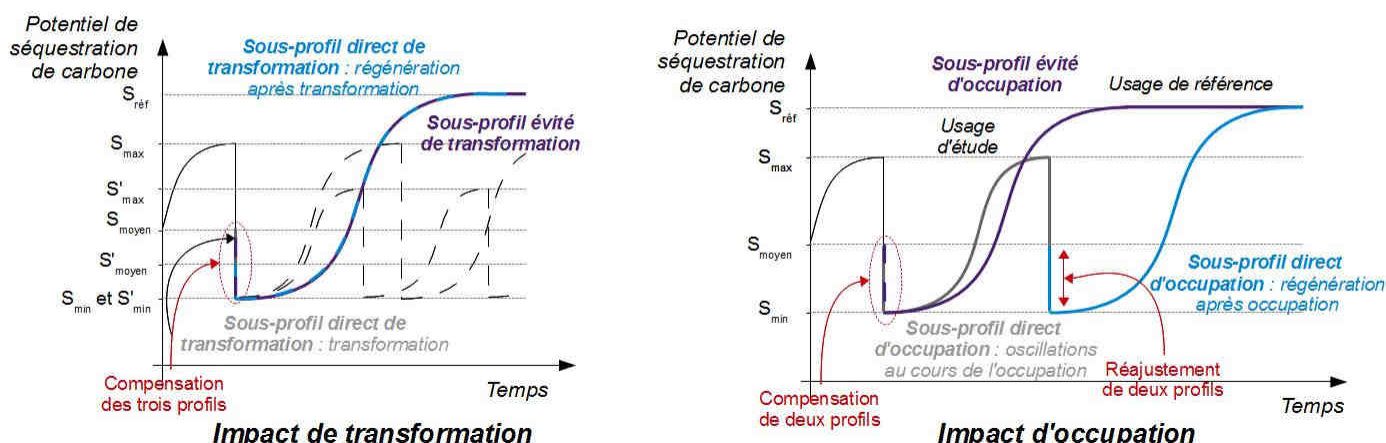
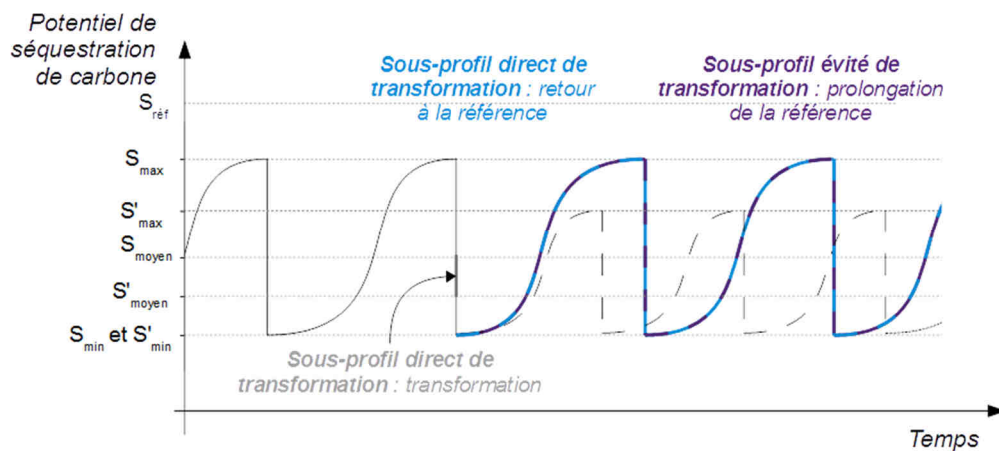


Figure 19 – Influence du choix du stock de démarrage pour la description des profils de transformation et d'occupation sur la détermination des impacts associés dans le cas de  $S'_{\min} \leq S_{\min}$

#### Remarque 2 : Application de la méthode en approche conséquentielle

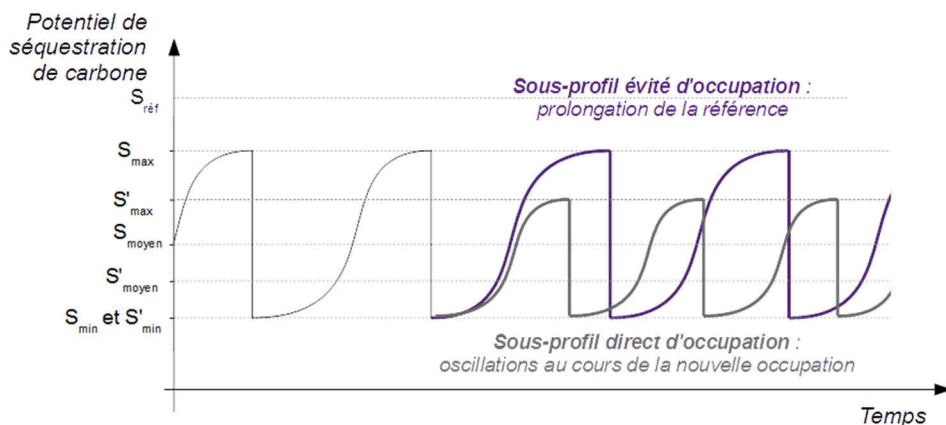
La principale différence entre approches attributionnelle et conséquentielle tient à la définition du scénario de référence : usage naturel en l'absence d'activités humaines en approche attributionnelle, usage le plus probable en absence de l'évolution étudiée en approche conséquentielle. Pour les scénarios considérés ici, les systèmes étudiés en approche conséquentielle impliquent un changement de pratiques sylvicoles ; le scénario de référence retenu ici en approche conséquentielle est alors la prolongation de la pratique sylvicole précédente (voir Figure 2c par exemple).

La Figure 20 présente alors la déclinaison du cadre général de la méthode d'usage des sols projet pour la détermination de l'impact de transformation en approche conséquentielle : celui-ci est obtenu en supposant un retour à la référence immédiatement après la transformation. La Figure 20 montre alors qu'en approche conséquentielle, comme en approche attributionnelle, l'impact de transformation est uniquement déterminé par le sous-profil direct de transformation. Comme précédemment, un effet supplémentaire peut être pris en compte lorsque les stocks de biomasse morte des deux usages sont différents. Les hypothèses de prise en compte de cet effet sont identiques quelle que soit l'approche considérée, conséquentielle ou attributionnelle.



**Figure 20 – Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage des sols projet pour la prise en compte de l'impact de transformation, en approche conséquentielle, lorsque  $S'_{\min} \leq S_{\min}$**

La Figure 21 décline ensuite le cadre général de la méthode d'usage du sol projet pour la détermination de l'impact d'occupation en approche conséquentielle. Comme indiqué à la section 1.2, afin d'éviter toute incohérence temporelle notamment, l'usage étudié et l'usage de référence sont comparés indéfiniment. Par conséquent, il n'apparaît aucun sous-profil de retour à la référence après la nouvelle occupation. L'impact d'occupation est alors défini comme la comparaison, à l'infini, des sous-profils direct et évité d'occupation. Dans le cadre de cette méthode, où l'évaluation des impacts sur le changement climatique est réalisée par PRG ajustés dans le temps, qui sont nuls à partir d'une année d'émission de 100 ans, la comparaison entre les deux sous-profils est donc limitée à 100 ans.



**Figure 21 – Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage des sols projet pour la prise en compte de l'impact d'occupation, en approche conséquentielle**

### 3. Résultats

#### 3.1. Influence du choix de la méthode d'impact sur les résultats de chaque scénario en approche attributionnelle

Dans le cadre de cette étude, chaque scénario a été évalué selon cinq méthodes d'impact en approche attributionnelle. Cependant pour qu'une comparaison des résultats soit valide, il est nécessaire que les mécanismes couverts par l'évaluation soient les mêmes.

Le tableau ci-dessous permet de visualiser quels sont les mécanismes couverts en approche attributionnelle pour chaque méthode mise en œuvre dans le volet d'analyses de sensibilité.

Mécanismes environnementaux considérés		Comptabilité totale avec PRG	Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps	Conversion ILCD	Usage du sol Müller-Wenk	Usage du sol Projet
	<i>Emission de GES</i>	Tous GES	Tous GES	Non	Non	Non
	<i>Potentiel de séquestration C : Transformation</i>	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
	<i>Potentiel de séquestration C : Occupation, aspect variations au cours de l'occupation</i>	Non	Oui	Non	Non	Oui
	<i>Potentiel de séquestration C : Occupation, aspect maintien du potentiel à un niveau différent d'un niveau de référence</i>	Non	Non	Non	Oui	Oui

**Tableau 6 – Mécanismes environnementaux couverts en approche attributionnelle par les méthodes d'impact considérées**

Par conséquent, en approche attributionnelle, il a été procédé pour chaque scénario aux comparaisons suivantes :

- Entre méthode suivant les mécanismes environnementaux :
  - Emissions de GES : Comptabilité totale avec PRG, Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps/émissions ;
  - Usage du sol/Transformation : Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps/Transformation, Conversion ILCD, Usage du sol Müller-Wenk/Transformation, Usage du sol Projet/Transformation ;
  - Usage du sol/Occupation : Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps/Occupation, Usage du sol Müller-Wenk/Occupation, Usage du sol Projet/Occupation ;
- Entre combinaison couvrant l'ensemble des mécanismes environnementaux :
  - Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps ;
  - Comptabilité totale avec PRG + Usage du sol Müller-Wenk ;
  - Comptabilité totale avec PRG + Usage du sol Projet ;
  - Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps limitée aux émissions + Usage du sol Projet.

Par ailleurs, les résultats de la combinaison [Comptabilité totale avec PRG + Conversion ILCD], ne couvrant pas le mécanisme de l'occupation de l'usage du sol mais réalisée à l'aide des méthodes les plus reconnues, ont été également fournis. Etant seule sur les champs qu'elle couvre, les résultats de cette combinaison ne font cependant pas l'objet d'analyse spécifique, au-delà de celles liées à chaque méthode qui la compose.

## Influence de la méthode d'impact relative au mécanisme des émissions

Les résultats montrent que quel que soit le scénario, l'impact des émissions biogéniques évalué de façon statique ou dynamique est nul, puisque la combustion a été supposée parfaite : l'ensemble du carbone récolté est ainsi utilisé et réémis sous forme de CO<sub>2</sub>. Pour l'évaluation avec les PRG ajustés dans le temps, il faut noter que l'égalité entre l'impact et le bénéfice s'explique par le fait supplémentaire que la récolte et la combustion se font lors de la même année et que la différenciation temporelle entre captation de CO<sub>2</sub> et récolte est comptabilisée dans le mécanisme d'occupation de l'usage du sol. Pour un usage matériaux avec une valorisation énergétique en fin de vie, il en serait différemment, la récolte et la fin de vie du produit bois n'ayant pas lieu la même année, alors que la comptabilité totale avec PRG mesurerait toujours un effet nul.

Pour les émissions fossiles, en revanche, les résultats montrent que l'impact varie entre une évaluation avec des PRG ajustés dans le temps et des PRG statiques. Cette différence va dépendre de la définition temporelle des systèmes évalués. Avec les hypothèses qui ont été prises dans nos cas d'étude ( $t_0$  au début du reboisement), l'énergie est produite dans le futur, aux différentes périodes de récolte, et donc l'impact des émissions est plus faible avec des PRG ajustés dans le temps qu'avec des PRG statiques, résultat accentué par l'hypothèse simplificatrice que toutes les émissions fossiles ont lieu au même moment, l'année de la récolte. On peut ainsi observer que le scénario qui présente le plus faible impact des émissions fossiles est celui correspondant à l'itinéraire sylvicole le plus long (2,1 éq kg CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur pour le scénario D 80, voir Figure 22), et le plus fort à l'itinéraire le plus court (4,2 éq. Kg CO<sub>2</sub>/GJ chaleur pour le scénario E bf, voir Figure 28). Mais la mise en œuvre de l'ACV dynamique introduisant donc une dimension temporelle dans la définition de l'unité fonctionnelle (GJ de chaleur produit l'année X), cette comparaison entre des énergies produites à des années différentes n'est intéressante que pour observer l'influence de l'année de production, et s'avère non valide pour comparer les scénarios entre eux qui dans leur définition temporelle ne sont pas comparables.

## Influence de la méthode d'impact relative au mécanisme de la transformation de l'usage du sol

Quel que soit le scénario de transformation étudié, la différence observée entre la méthode conversion ILCD et celle de Müller-Wenk/transformation est toujours identique. Elle correspond à la pondération qu'introduit Müller-Wenk entre la durée de vie moyenne du carbone dans l'occupation de référence (100 ans avec les hypothèses prises dans le scénario d'occupation de référence défini dans le cadre du projet) et celle de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (157 ans, défini par Müller-Wenk), soit 100/157 avec les hypothèses prises dans le cadre de cette étude. Les résultats obtenus avec Müller-Wenk sont donc avec nos hypothèses d'étude inférieures de 37% par rapport à ceux obtenus avec la méthode conversion ILCD.

Lorsque le stock de biomasse morte à l'équilibre de l'occupation étudiée est inférieur à celui de l'occupation antérieure, les résultats de la méthode projet/transformation sont identiques à ceux obtenus avec la méthode conversion ILCD. Dans le cas inverse, l'atténuation du changement climatique mesurée est très légèrement inférieure tenant compte d'un effet de transition jusqu'à l'équilibre du stock de biomasse morte. Cette différence dans nos cas d'étude est non significative (voir Figure 27, Figure 30, Figure 32, Figure 36).

En ce qui concerne les méthodes basées sur les PRG ajustés dans le temps, les différences de résultats entre elles peuvent s'expliquer du fait qu'elles divergent sur :

- L'affectation des compartiments de stocks de carbone entre usages successifs : effective pour la méthode d'usage du sol projet, absente pour la méthode de la comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps ;
- La durée considérée pour prendre en compte des effets de la transformation : sur la durée totale de la transformation pour la méthode d'usage du sol projet, uniquement durant le temps de l'occupation pour la méthode de la comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps ;
- La prise en compte de l'usage de référence : effective pour la méthode d'usage du sol projet, absente pour la méthode de la comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps.

## Influence de la méthode d'impact relative aux mécanismes de l'occupation de l'usage du sol

### « Aspect maintien »

Les deux méthodes testées, Usage du sol Müller-Wenk et Usage du sol Projet, pour l'évaluation du maintien du potentiel de séquestration à un niveau différent d'un niveau de référence, mesurent toujours un impact quel que soit le scénario. Les différences de résultats observées entre ces deux méthodes varient d'un scénario à un autre, parfois pratiquement nulles comme pour le scénario taillis de châtaignier (voir Figure 33), parfois très significatives comme pour le scénario plantation de douglas à 80 ans de révolution (voir Figure 22) avec un impact plus de onze fois plus important avec la méthode projet. Pour l'ensemble des scénarios, la méthode Müller-Wenk mesure un impact inférieur à celle projet.

Ces résultats s'expliquent notamment par le fait que :

- Les stocks considérés ne sont pas les mêmes entre les deux méthodes : pour la méthode Müller-Wenk, il s'agit d'une différence entre le stock moyen de l'occupation étudiée et le stock à l'équilibre de l'usage de référence, alors que pour la méthode projet, il s'agit de considérer comment évolue le stock année par année lors de la régénération naturelle sur les 100 premières années en partant du stock à  $t_0$  (stock après récolte finale de l'occupation étudiée) ; pour cette dernière méthode, la prise en compte du stock moyen atteint par l'occupation étudiée est intégrée sur l'aspect variations ;
- Avec la méthode projet, les facteurs de caractérisation sont peu sensibles au système d'étude ; en effet, ces facteurs sont calculés à partir du profil évité de régénération vers l'occupation de référence sur les 100 premières années (les PRG après 100 ans étant nul) et du profil direct de régénération sur les années restantes entre la fin de l'occupation étudiée et 100 ans. Les PRG ajustés dans le temps du  $\text{CO}_2$  constituant pratiquement une fonction linéaire (voir Figure 20 de la partie 1 du rapport sur l'état de l'art), l'effet de décalage du profil de régénération, bien que variable selon les durées de révolution, devient relativement constant dans notre cas d'étude lorsqu'il est exprimé par année d'occupation, autour de  $2550 \text{ eq kg CO}_2/(\text{ha.an})$  (voir Tableau 7) ;
- Avec la méthode Müller-Wenk, les facteurs de caractérisation sont fonction de la différence de stock moyen entre l'occupation de référence (ici correspondant au stock max obtenu avec le chêne, soit 153 tonnes de C/ha (voir Figure 9)) et l'occupation étudiée, variant de façon significative d'un scénario à l'autre (144 tonnes de C/ha pour les plantations de douglas à 80 ans de révolution (voir Figure 3), contre 48 tonnes de C/ha pour les taillis de châtaignier (voir Figure 8)).

Unité du facteur de caractérisation	Durée de révolution de l'occupation étudiée					
	20 ans	30 ans	40 ans	45 ans	60 ans	80 ans
eq t C/(ha.an)	0.69	0.68	0.69	0.70	0.72	0.69
eq kg $\text{CO}_2/(\text{ha.an})$	2539	2509	2530	2552	2643	2543

**Tableau 7 – Facteurs de caractérisation calculés sur différentes révolutions pour la Méthode d'Usage du sol Projet/occupation Aspect maintien**

### « Aspect variations »

En ce qui concerne l'évaluation des effets de la dynamique des variations de stock, dans nos cas d'étude, cet effet est toujours un bénéfice pour la méthode d'usage du sol Projet et la Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, car il s'agit de scénarios sylvicoles de forêt anthropique impliquant que la croissance des peuplements affectable au bois récolté soit celle ayant lieu avant la récolte et non pas après la récolte.

Il faut noter qu'en prenant l'hypothèse inverse, cet effet pourrait également mesurer une contribution au changement climatique (voir section 3.2. Figure 40).

La méthode Projet mesure une atténuation au changement climatique toujours plus importante que celle de la comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps du fait que cette dernière comptabilise dans le stock de carbone la biomasse morte issue des cycles précédents toujours présente au  $t_0$  du cycle étudié et qui se décompose.

Concernant la méthode usage du sol Müller-Wenk, cet aspect « variation » est négligée.



## Total Occupation

Les résultats sur le total de l'occupation montrent que la comparaison avec un usage de référence, que comprend la méthode Usage du sol Projet, à la différence de la méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, suivant les scénarios, :

- Limite le bénéfice des variations (scénarios douglas, voir Figure 22, Figure 23, Figure 25, Figure 27) ;
- Annule ce bénéfice (scénarios eucalyptus, voir Figure 24, Figure 26, Figure 28 à Figure 32) ;
- Inverse le résultat total de l'occupation (scénarios châtaignier, voir Figure 33 à Figure 36).

La méthode Usage du sol Projet permet donc de fournir des résultats contrastés sur le total occupation suivant les différents scénarios, mesurant parfois un bénéfice, dans d'autres cas un effet non significatif, ou encore un impact, à la différence de la méthode Usage du sol Müller-Wenk mesurant toujours une contribution au changement climatique. Cette différence entre les deux méthodes tient notamment au fait que la méthode d'usage du sol Müller-Wenk ne tient compte, pour le calcul de cet impact, que d'une différence de stocks et non de la dynamique de régénération.

## Influence des combinaisons couvrant l'ensemble des mécanismes

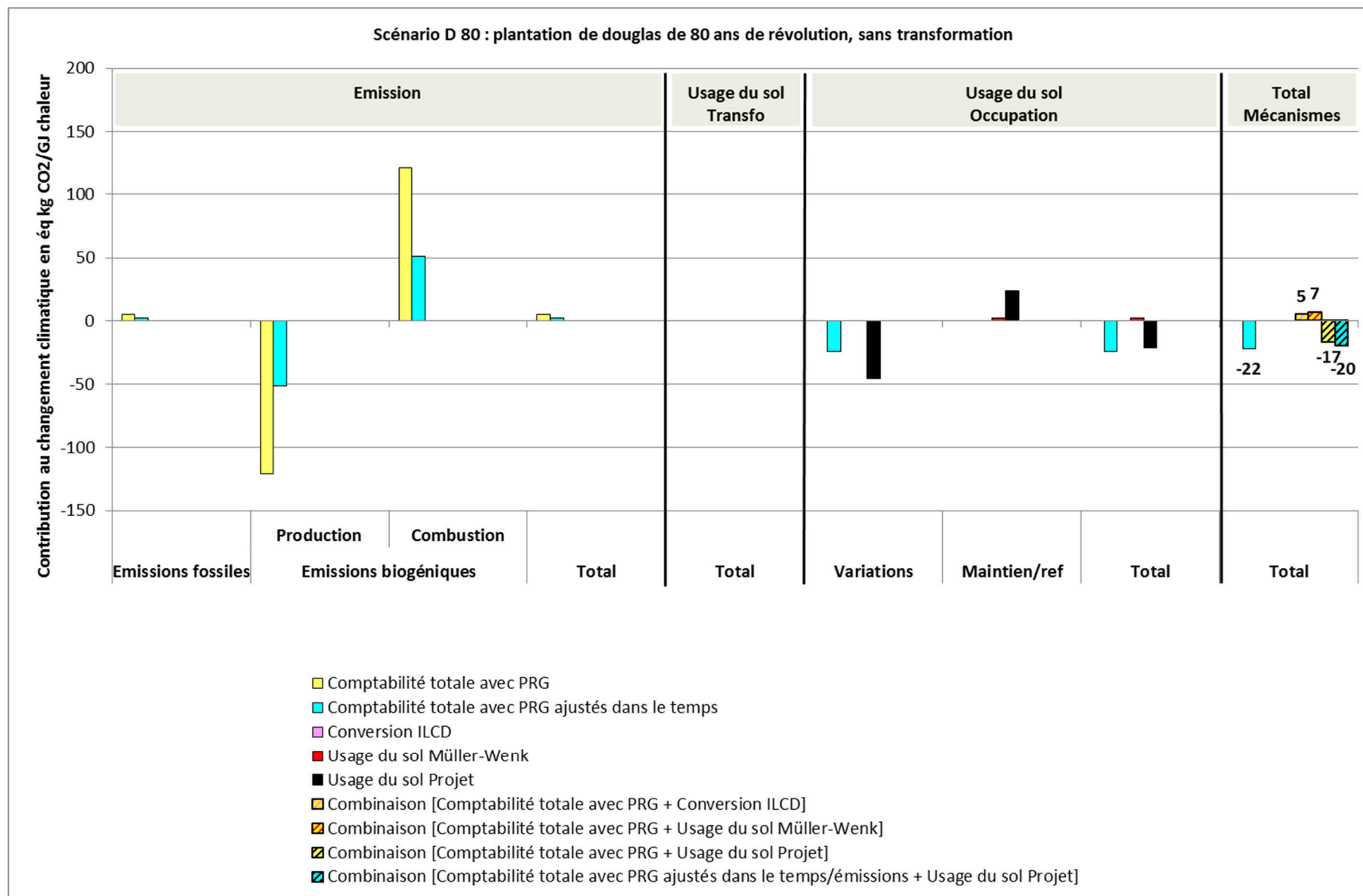
En comparant les résultats obtenus selon les différentes combinaisons scénario par scénario, les tendances suivantes étudiées peuvent être observées :

- Les résultats les plus favorables sont toujours obtenus avec la méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, du fait que cette combinaison n'intègre pas dans sa méthode d'évaluation un comparatif avec un usage de référence (usage « naturel » ne correspondant pas à l'usage antérieur) et que les scénarios de production de la biomasse sont tous considérés comme des scénarios où le début du cycle commence au reboisement et non à la récolte ; les résultats sont toujours en dessous du niveau d'émissions fossiles (5 éq kg CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur, correspondant au résultat obtenu en « neutralité carbone ») sauf pour le scénario de raccourcissement de la révolution de 60 à 40 ans de la plantation de douglas (voir Figure 26), pour le scénario d'évolution de la récolte de bois fort à arbre entier du TCR d'eucalyptus (voir Figure 31), ainsi que pour le scénario de transformation d'une futaie en taillis de châtaignier (voir Figure 35) pour lesquels le bénéfice de l'occupation ne compense pas l'impact de la transformation et des émissions fossiles ;
- Les résultats les plus défavorables sont observées avec la combinaison [Comptabilité totale avec PRG + Usage du sol Müller-Wenk] sauf pour le scénario transformation d'une futaie en taillis de châtaignier (voir Figure 35) seul cas où le bénéfice des aspects variations de la méthode Projet est inférieur à l'impact supplémentaire de transformation mesuré par la méthode Projet par rapport à la méthode Müller-Wenk ; avec cette combinaison, le bilan global est toujours plus impactant que celui des émissions fossiles (5 éq kg CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur, correspondant au résultat obtenu en « neutralité carbone ») sauf pour les scénarios de conversion d'une terre agricole en TCR d'eucalyptus (-9 éq kg CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur, voir Figure 30) et de rallongement de la révolution de 40 à 60 de plantation de douglas (3 éq kg CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur, voir Figure 27), pour lesquels le bénéfice de la transformation arrive à compenser l'impact des émissions fossiles et l'impact de l'occupation toujours évaluée comme contribuant au changement climatique avec la méthode Müller-Wenk ;
- Les différences de résultats sont limitées entre les combinaisons [Comptabilité totale avec PRG + Usage du sol Projet] et [Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps + Usage du sol Projet], la différence entre ces deux méthodes provenant uniquement de la différence d'évaluation de l'impact des émissions fossiles entre PRG statiques et PRG ajustés dans le temps ;
- Avec les combinaisons avec la méthode Usage du sol Projet, les résultats obtenus sont contrastés entre les scénarios ; ils peuvent être de façon très significative au-dessus ou en-dessous de l'impact des émissions fossiles (5 éq kg CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur, correspondant au résultat obtenu en « neutralité carbone »), selon les scénarios étudiés :
  - Au-dessus, dans les cas suivants :
    - Sans transformation, à partir du moment où l'occupation est un impact, c'est-à-dire que la dynamique des variations de stock n'arrive pas à compenser l'impact du maintien du potentiel à un niveau différent d'un niveau de référence : cas des TCR d'eucalyptus (voir Figure 28 et Figure 29), cas du taillis et de la futaie sur souche de châtaignier (voir Figure 34 et Figure 34) ;
    - Avec transformation, lorsque celle-ci est un impact (c'est-à-dire lorsque celle-ci dégrade le potentiel de séquestration), et que l'occupation constitue un impact également : cas du TCR d'eucalyptus avec évolution de la récolte de bois fort à arbre entier (voir Figure 31), cas de la transformation d'une futaie sur souche de châtaignier en taillis (voir Figure 35) ;

- Avec transformation, lorsque celle-ci est un impact et que l'occupation constitue un bénéfice, si la transformation dégrade le potentiel de séquestration au-delà du bénéfice que peut apporter l'occupation : cas du raccourcissement de révolution d'une plantation de douglas de 80 à 60 ans (voir Figure 26) et de 60 à 40 ans (voir Figure 26) ;
- Avec transformation, lorsque celle-ci constitue un bénéfice et que l'occupation est un impact, si le bénéfice de la transformation ne compense pas suffisamment l'impact de l'occupation : cas de la conversion du taillis de châtaignier en futaie (voir Figure 36) ;
- En-dessous, dans les cas suivants :
  - Sans transformation, à partir du moment où l'occupation est bénéfique, c'est-à-dire que la dynamique des variations de stock arrive à compenser l'impact du maintien du potentiel à un niveau différent d'un niveau de référence : cas des plantations de douglas (voir Figure 22 à Figure 24) ;
  - Avec transformation, lorsque celle-ci est un bénéfice et que l'occupation est un bénéfice : cas des plantations de douglas avec allongement de la révolution de 40 à 60 ans (voir Figure 27) ;
  - Avec transformation, lorsque celle-ci est un impact et que l'occupation bénéficie, si la dynamique des variations de stock arrive à compenser l'impact du maintien du potentiel à un niveau différent d'un niveau de référence ainsi que l'impact de la transformation : cas du raccourcissement de révolution de 80 à 60 ans d'une plantation de douglas (voir Figure 25) ;
  - Avec transformation, lorsque celle-ci constitue un bénéfice et que l'occupation est un impact, si la transformation compense l'impact de l'occupation : cas de l'installation d'un TCR d'eucalyptus sur une friche agricole (voir Figure 30), cas d'une évolution de récolte d'arbre entier à bois fort d'un TCR eucalyptus (voir Figure 32).

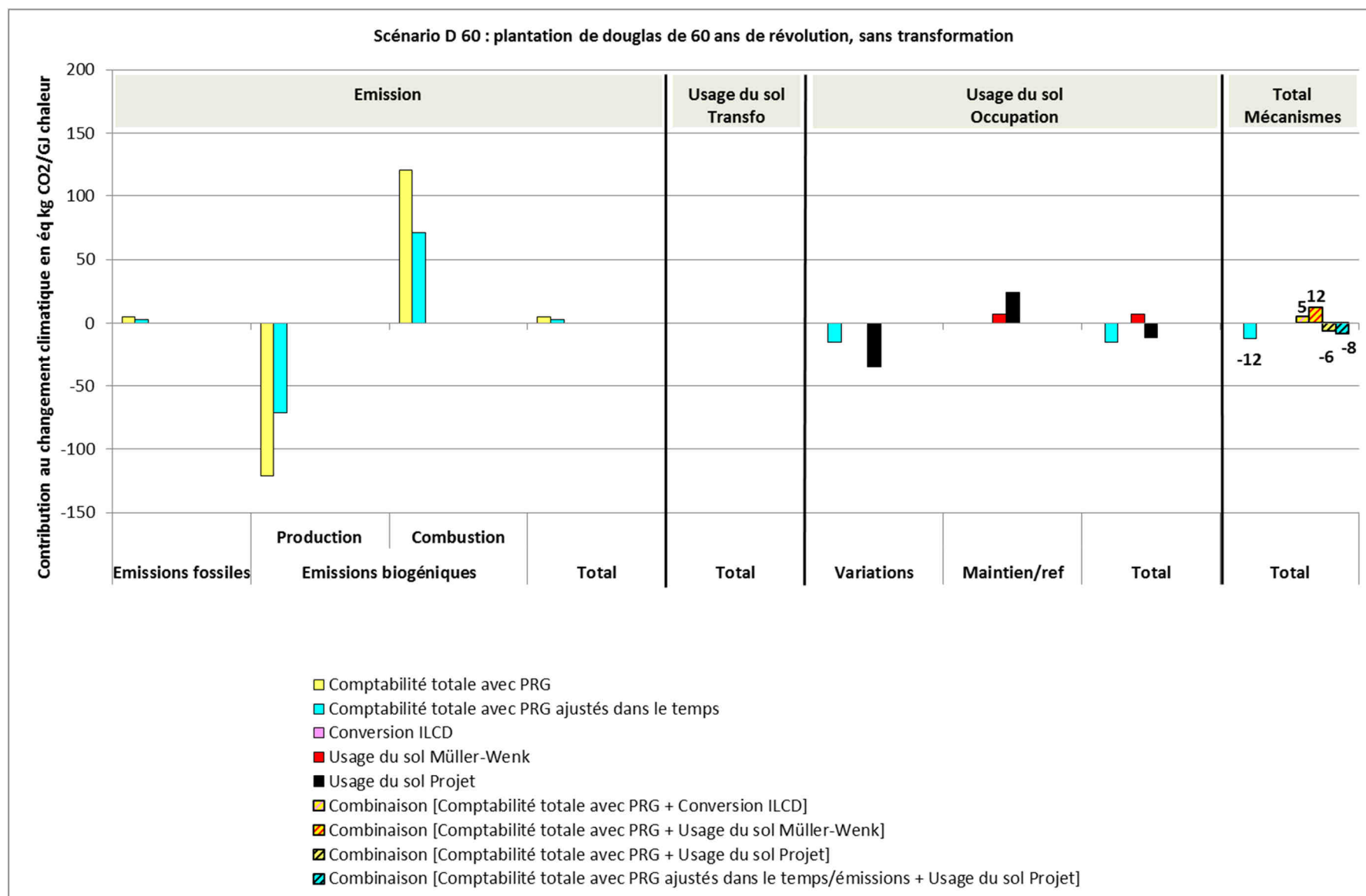
Par ailleurs, concernant l'évaluation des scénarios par rapport au respect du critère de durabilité de la directive énergie renouvelable exigé pour les biocarburants et bioliquides à partir de janvier 2018 de 60% de réduction d'émissions de GES, les résultats montrent (voir Figure 37 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) que :

- Pour certains scénarios, le choix de la méthode n'est pas sensible, le critère étant
  - respecté quelle que soit la méthode : D80, D60, D40, D60 (80->60), D60 (40->60), tous les scénarios de TCR d'eucalyptus, C f (t->f) ;
  - non respecté : C t (f->t) ;
- Pour d'autres scénarios, D40 (60->40), C t et C f, le choix de la méthode est sensible :
  - Avec la méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, la combinaison [Comptabilité totale avec PRG et Conversion ILCD] et la combinaison [Comptabilité totale avec PRG et Usage du sol Projet] : respect du critère pour ces trois scénarios ;
  - Avec la combinaison [Comptabilité totale avec PRG et Usage du sol Müller-Wenk] : non-respect du critère pour ces trois scénarios ;
  - Avec la combinaison [Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps/émissions et Usage du sol Projet] : non-respect du critère sauf pour le scénario C f.



**Figure 22 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 80**





**Figure 23 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 60**

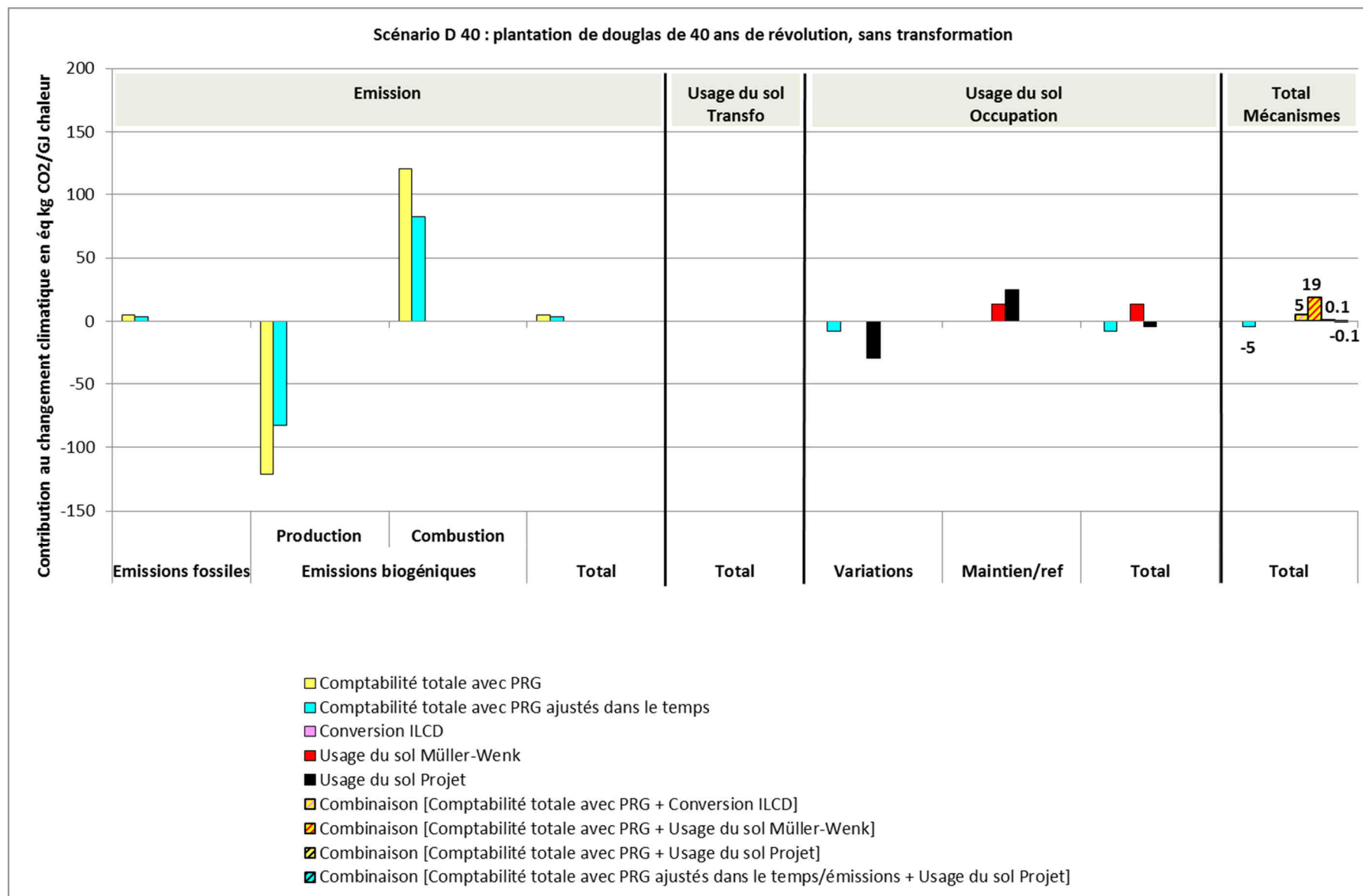
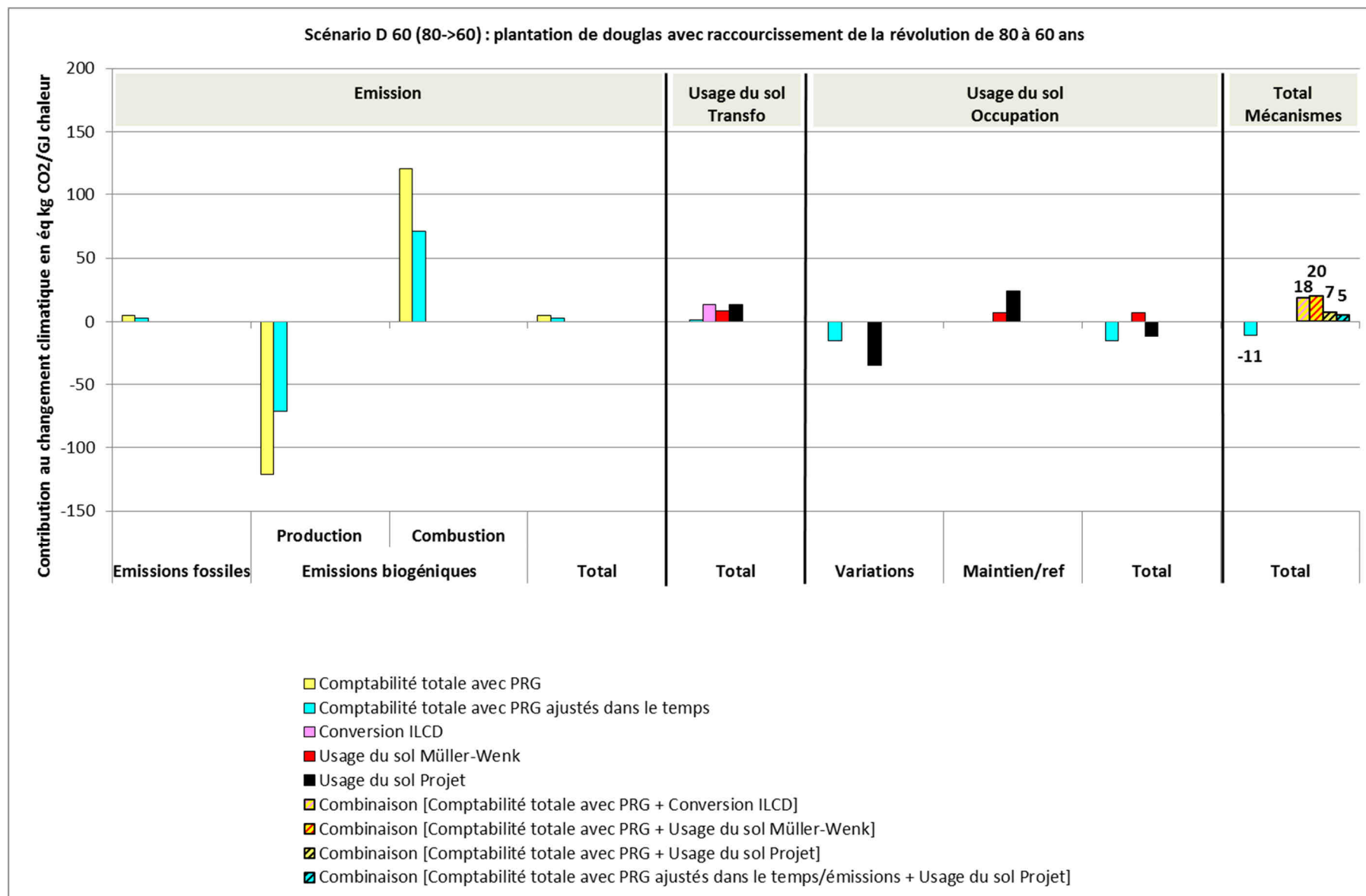
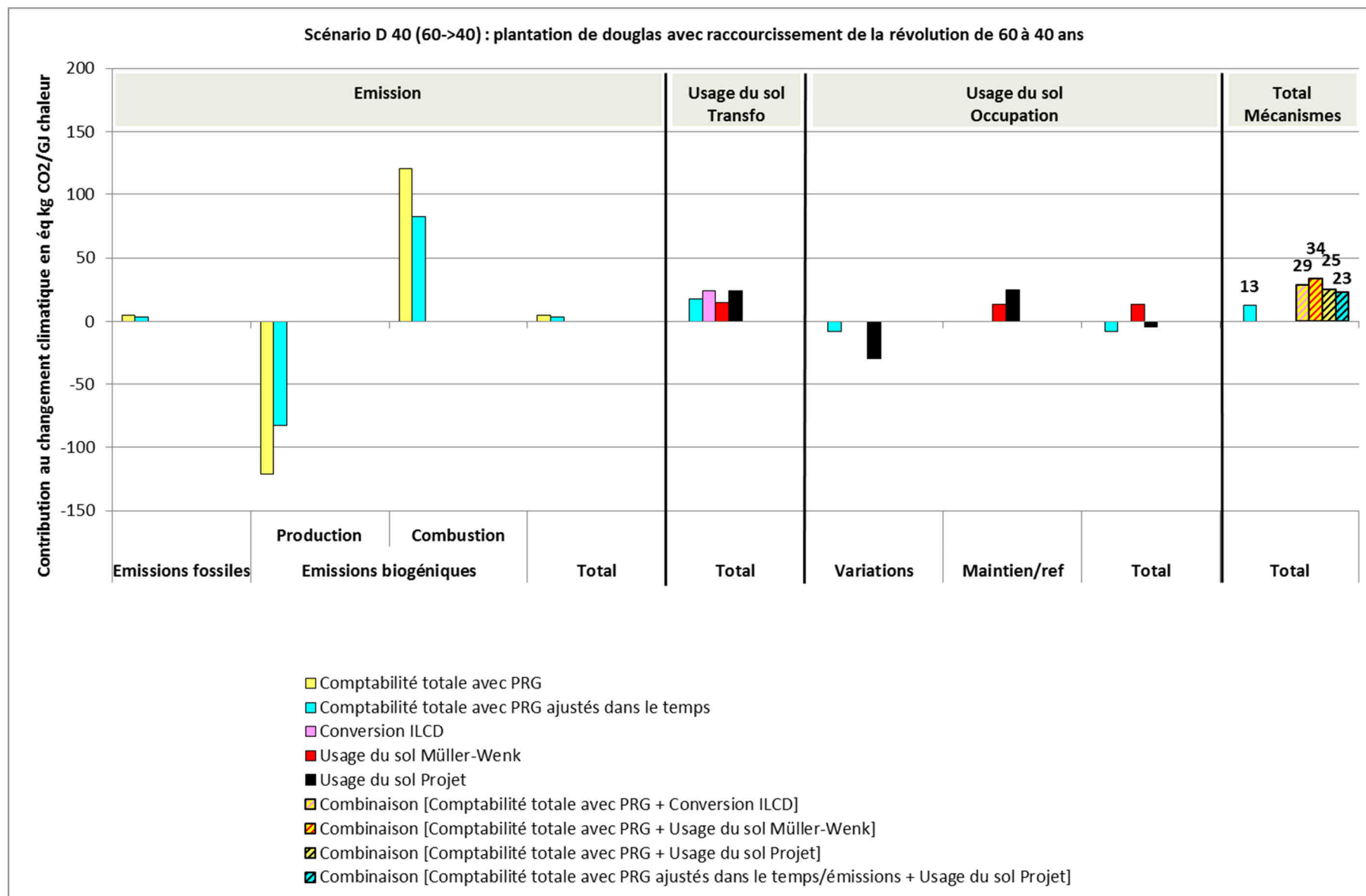


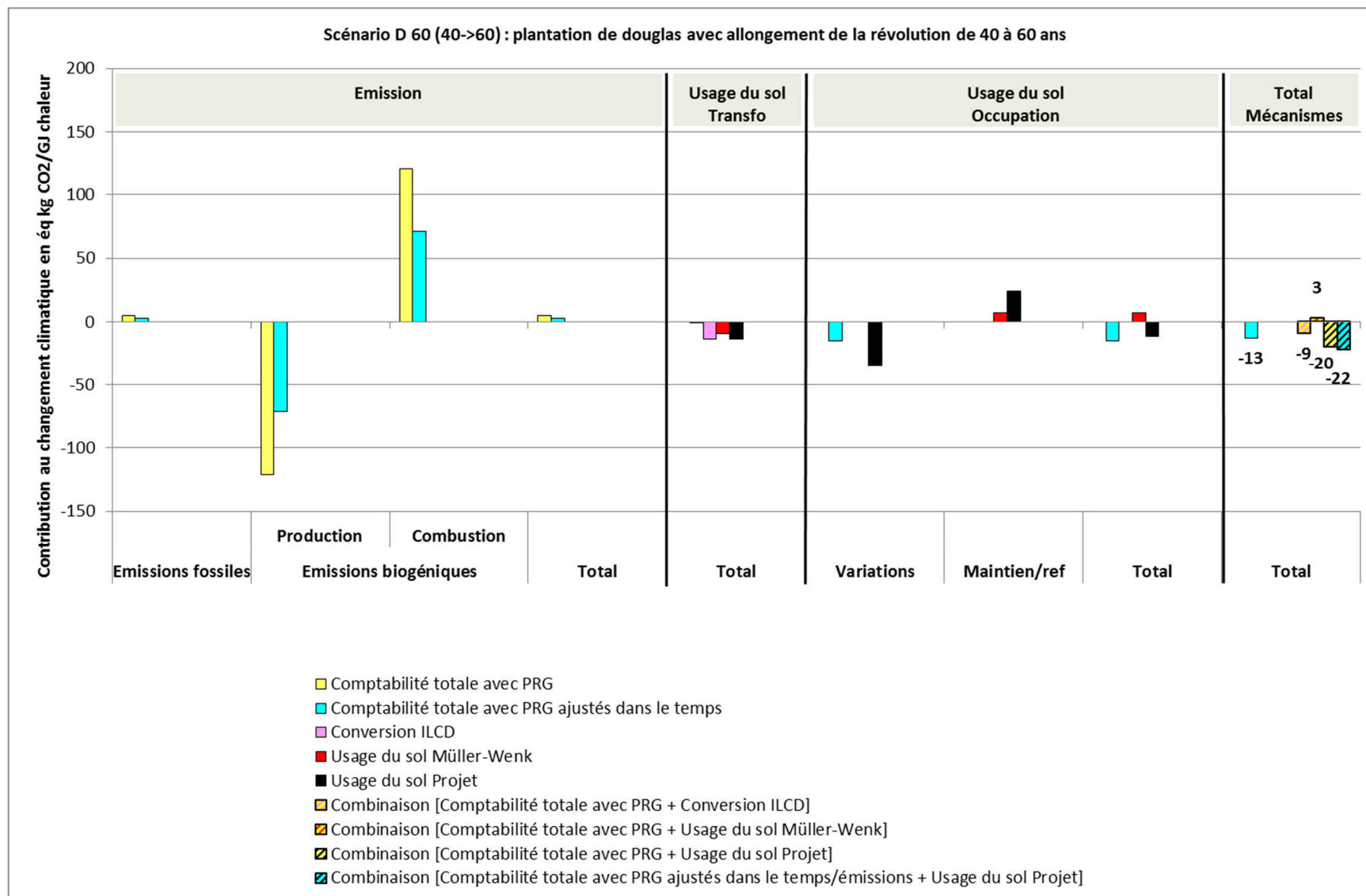
Figure 24 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 40



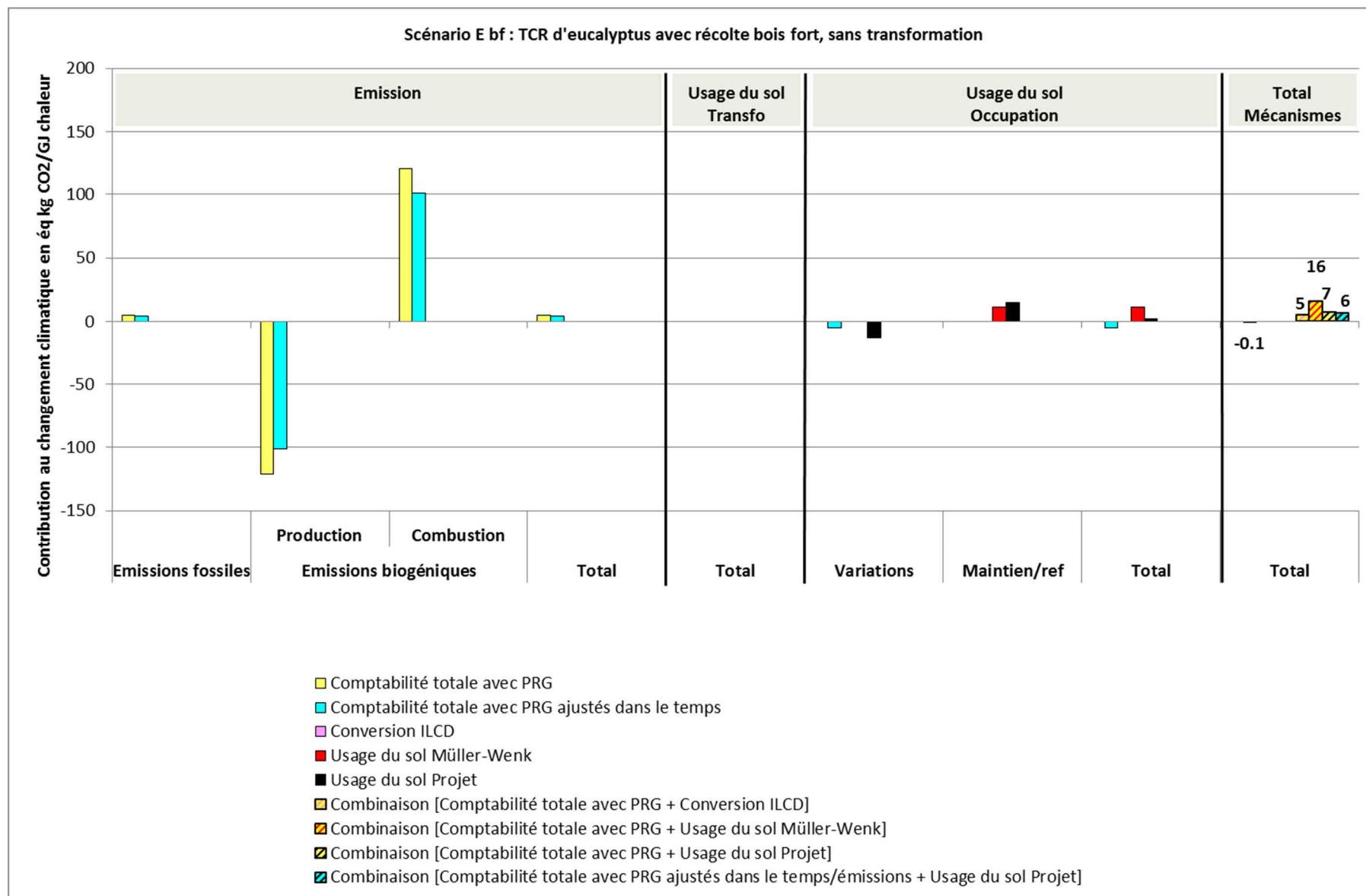
**Figure 25 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 60 (80->60)**



**Figure 26 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 40 (60->40)**

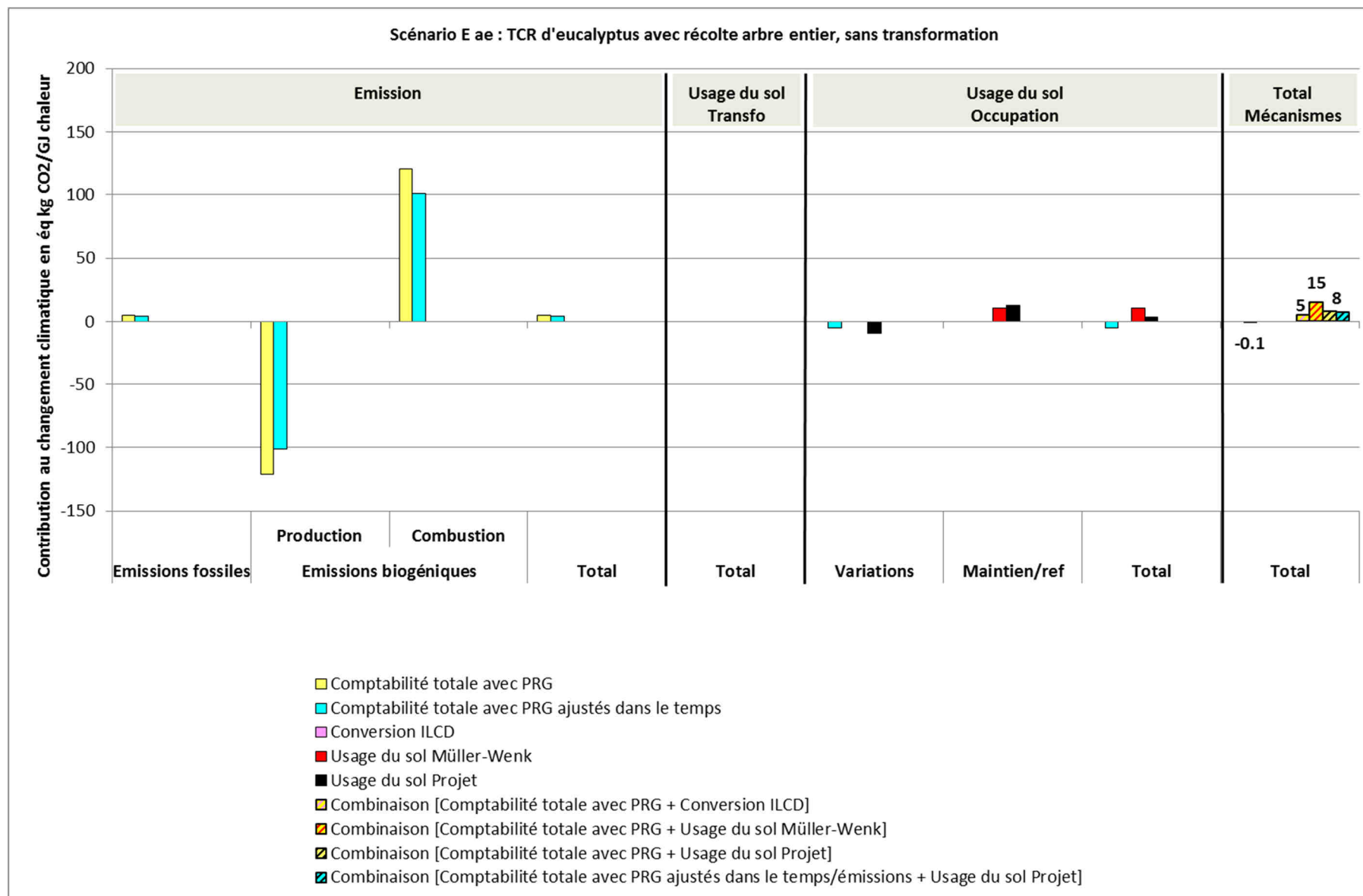


**Figure 27 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 60 (40->60)**

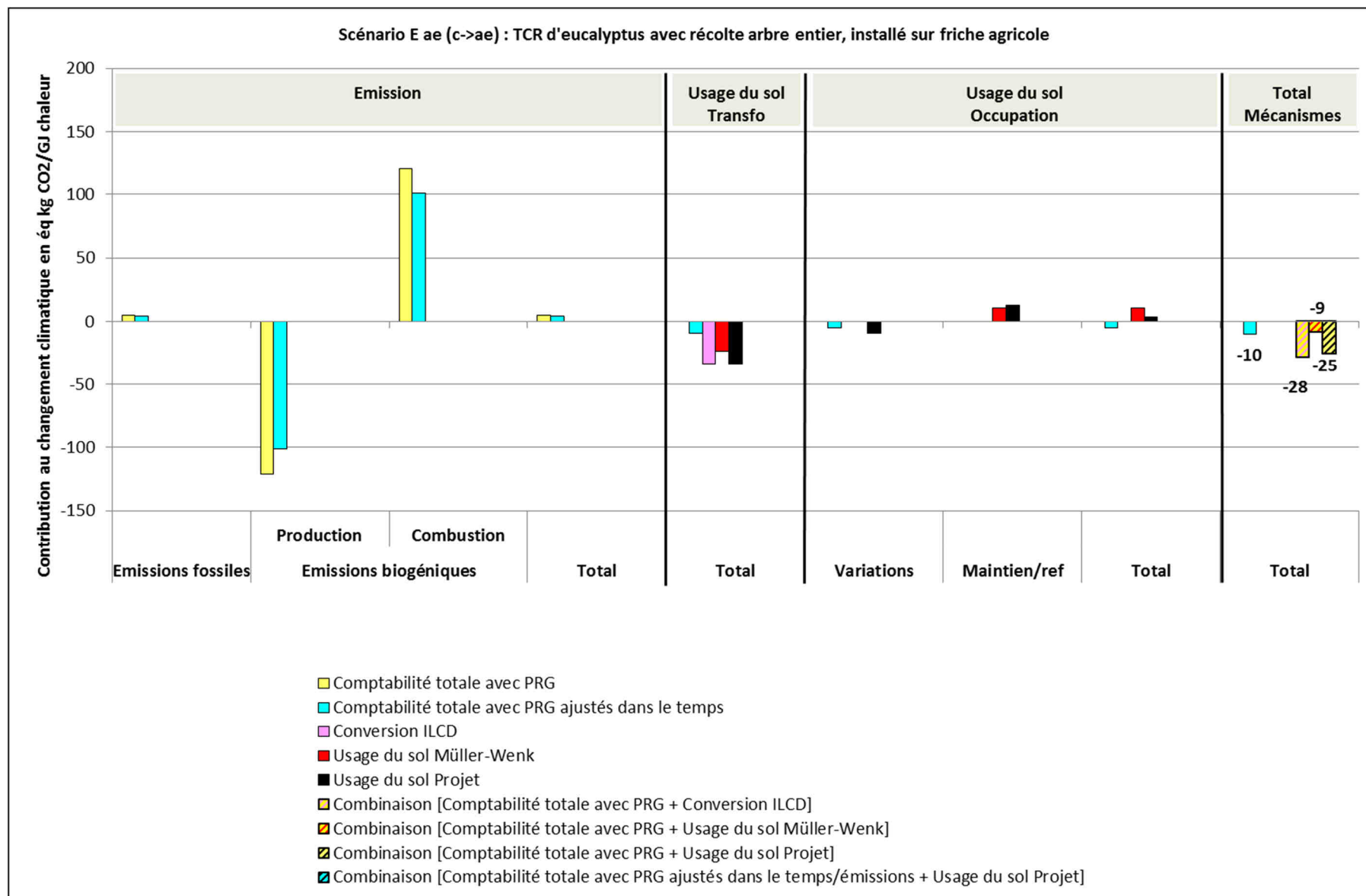


**Figure 28 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E bf**

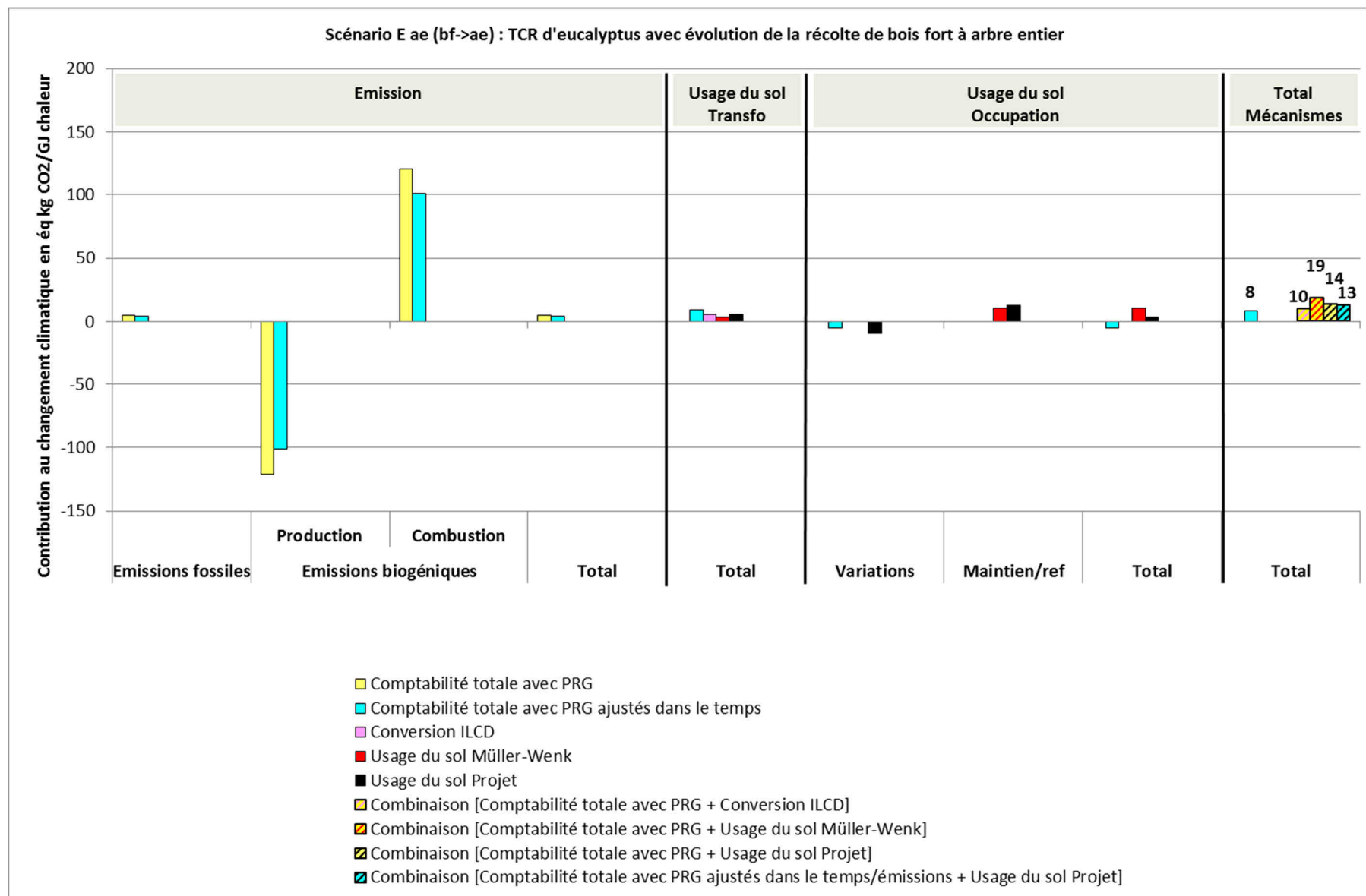




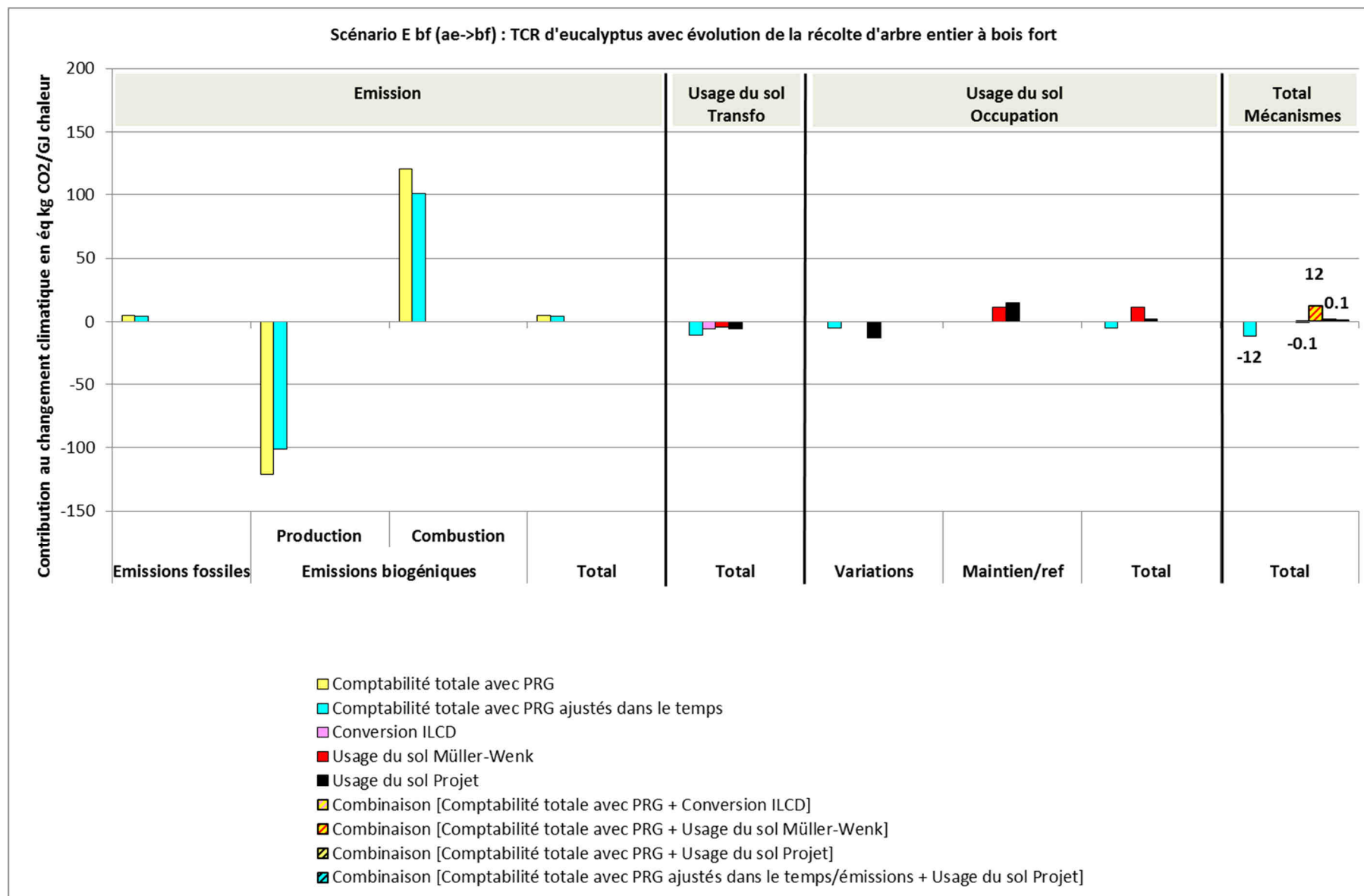
**Figure 29 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E ae**



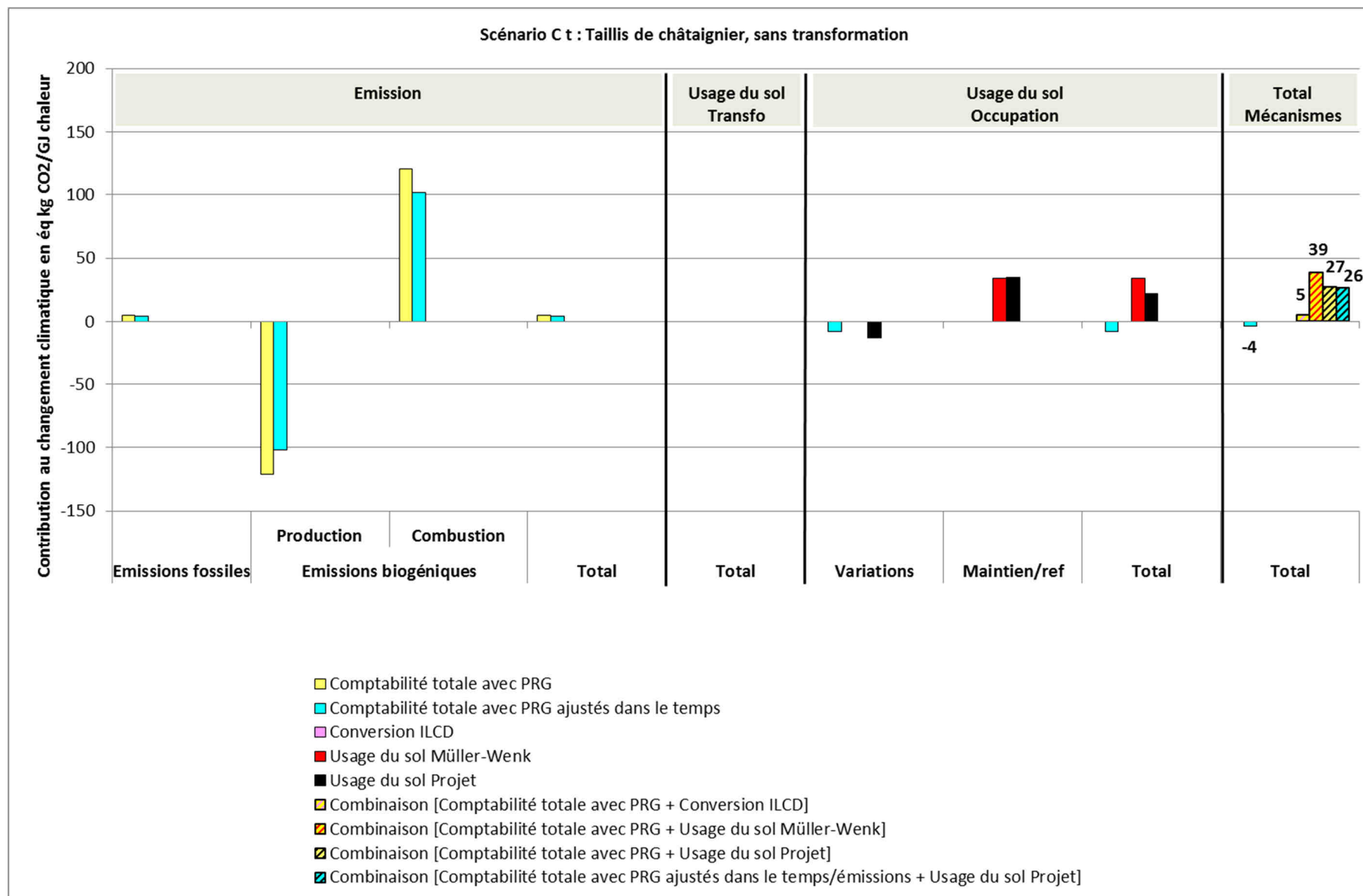
**Figure 30 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E ae (c->ae)**



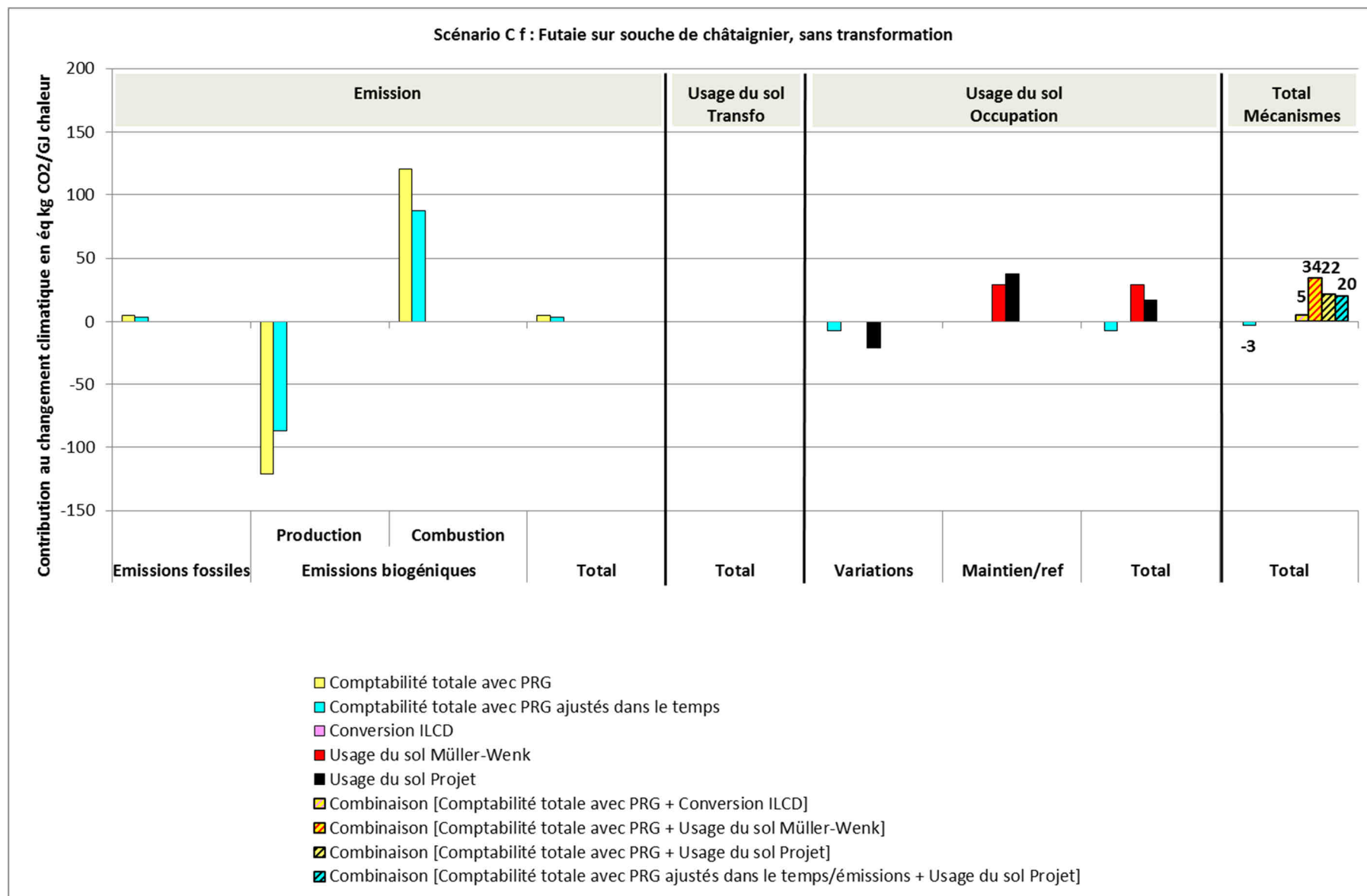
**Figure 31 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E ae (bf->ae)**



**Figure 32 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E bf (ae->bf)**

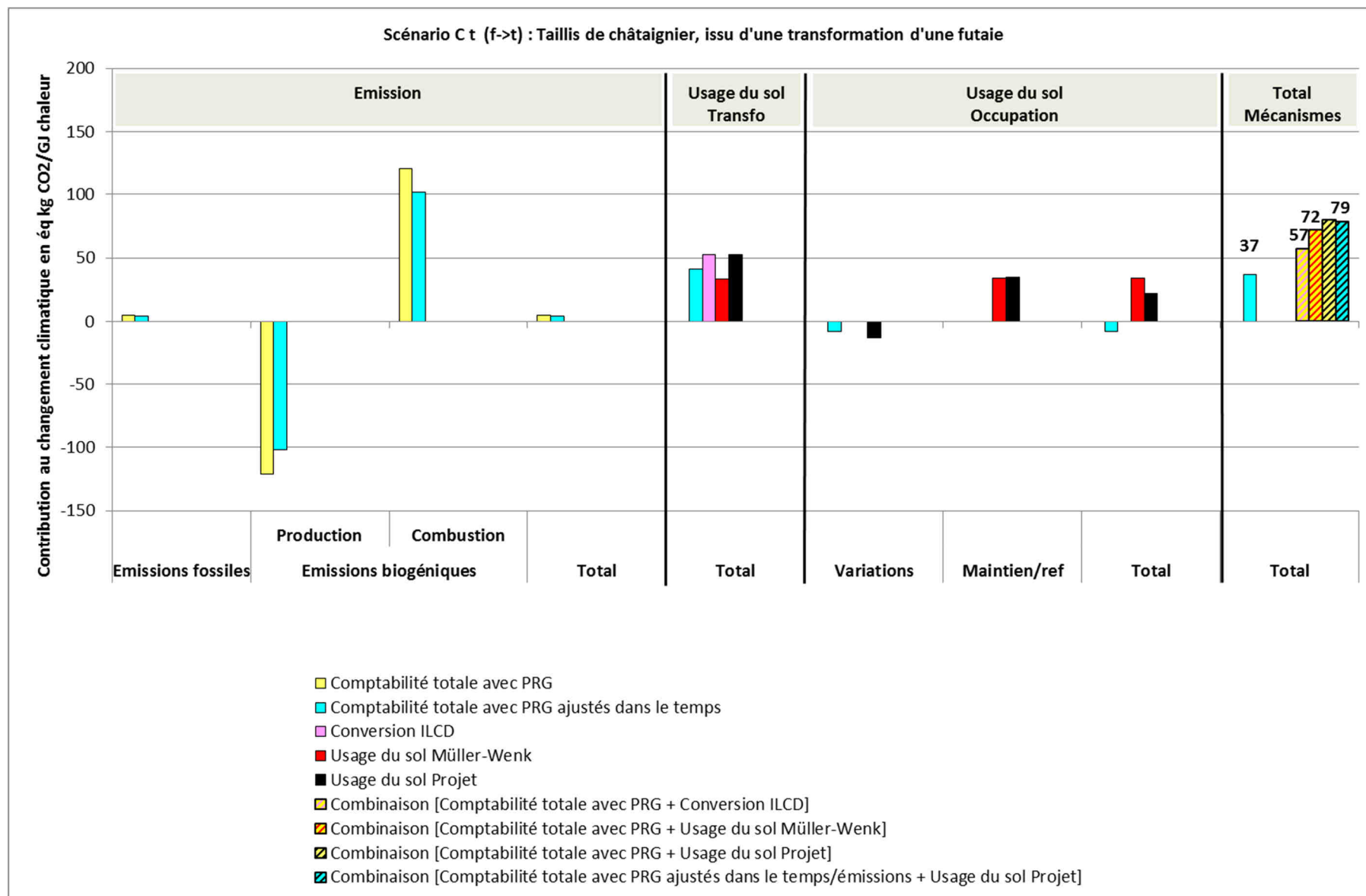


**Figure 33 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C t**

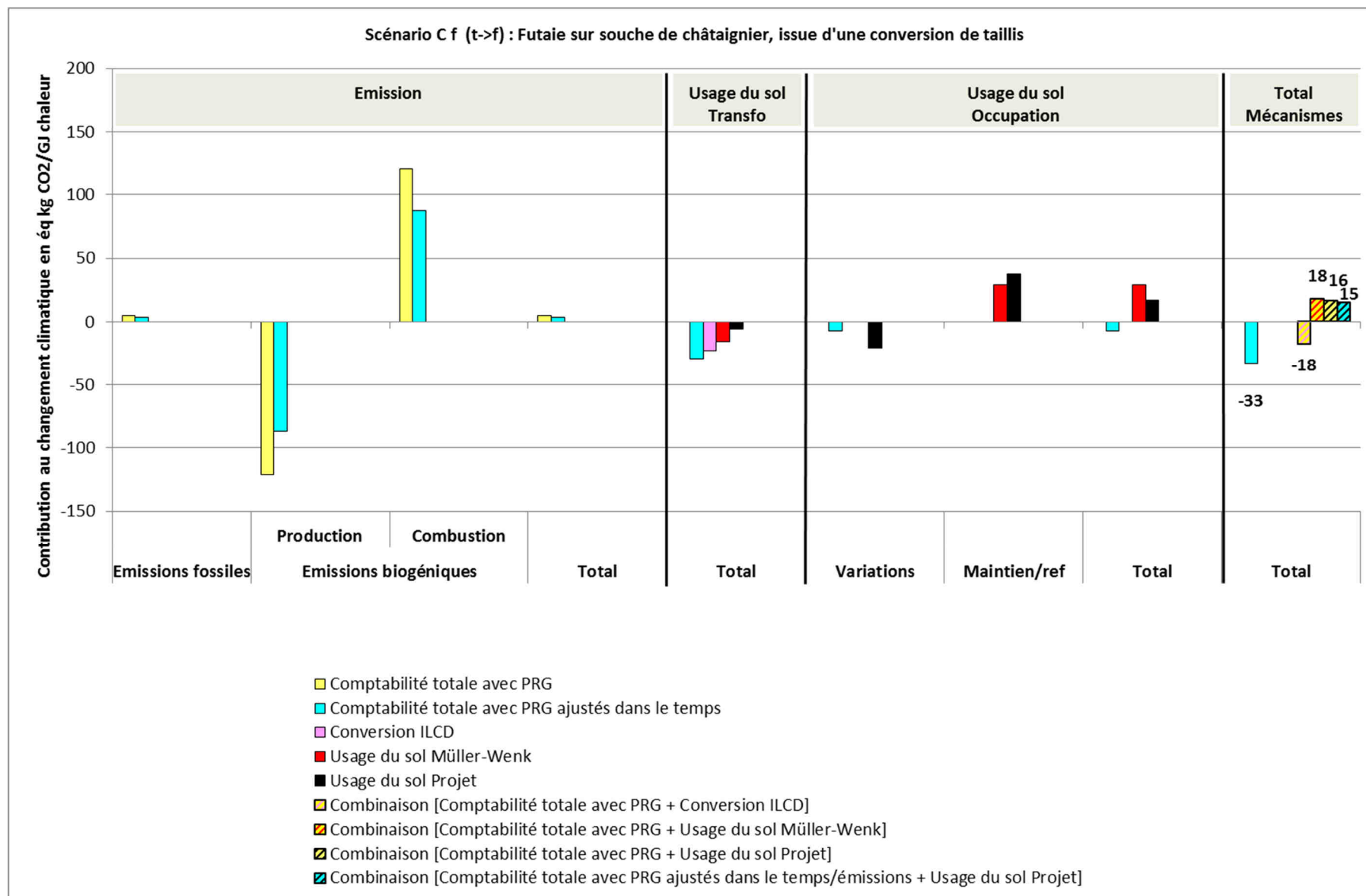


**Figure 34 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C f**

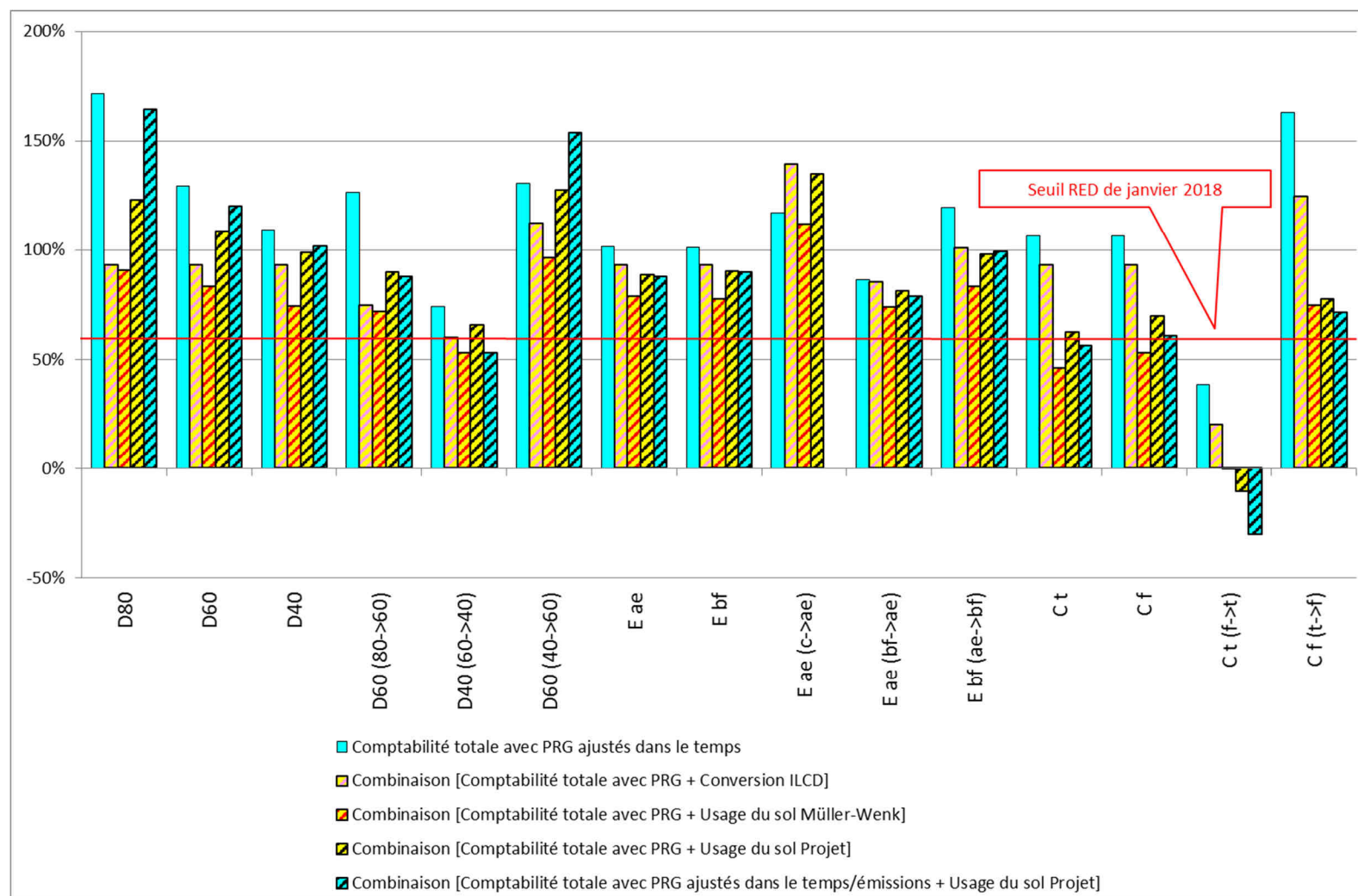




**Figure 35 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C t (f->t)**



**Figure 36 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C f (t->f)**



**Figure 37 – Estimation suivant la méthode de la réduction de GES apportée par la production de chaleur selon différents types d’approvisionnements bois par rapport à la production de chaleur à partir de gaz naturel, en approche attributionnelle**

Rappel : pour un scénario donné attention aux comparaisons des résultats selon les différentes méthodes, celles-ci ne couvrant pas systématiquement les mêmes mécanismes environnementaux (voir Tableau 6).

### 3.2. Analyse de la sensibilité aux données et hypothèses en approche attributionnelle

En complément des calculs réalisés à la section 3.1, une analyse de sensibilité des résultats a été effectuée sur :

- Le choix du positionnement du  $t_0$  dans le cycle sylvicole pour les méthodes faisant appel aux PRG ajustés dans le temps sur le scénario taillis de châtaignier ;
- Le scénario d'usage de référence pour les méthodes y faisant appel ;
- Le choix d'affectation des impacts sur les scénarios de transformation à l'origine d'une production additionnelle.

#### Sensibilité au choix du positionnement du $t_0$ dans le cycle

Comme expliqué dans la section 2.3, la mise en œuvre des méthodes faisant appel aux PRG ajustés dans le temps (méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps et méthode Usage du sol Projet) nécessite de faire un choix sur le positionnement du  $t_0$  par rapport au cycle sylvicole. La logique de définition des frontières du système en ACV est basée à minima sur les liens de flux physiques et fonctionnels existants entre les processus, conduisant ainsi naturellement à considérer que le cycle sylvicole démarre à la naissance du peuplement (reboisement ou boisement). Cette hypothèse, consistant à considérer qu'au sein d'une succession d'usages identiques chaque usage est décrit à partir du (re)boisement, a été considérée comme l'hypothèse de base dans le cadre de l'étude (hypothèse 1, voir Figure 38).

Une analyse de sensibilité de cette hypothèse sur les résultats a été menée en complément sur un des cas d'étude, celui de la chaleur produite à partir de biomasse provenant de taillis simple de châtaignier sans transformation. Dans ce cadre, il a été testé l'hypothèse qu'au sein d'une succession d'usages identiques, chaque usage est décrit à partir de la récolte (hypothèse 2, voir Figure 38).

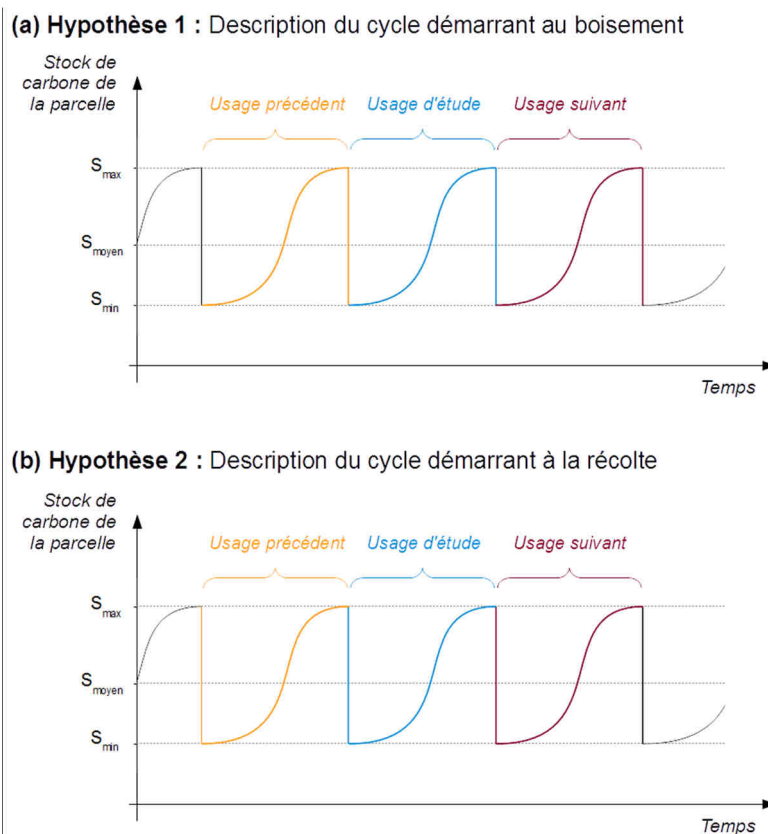
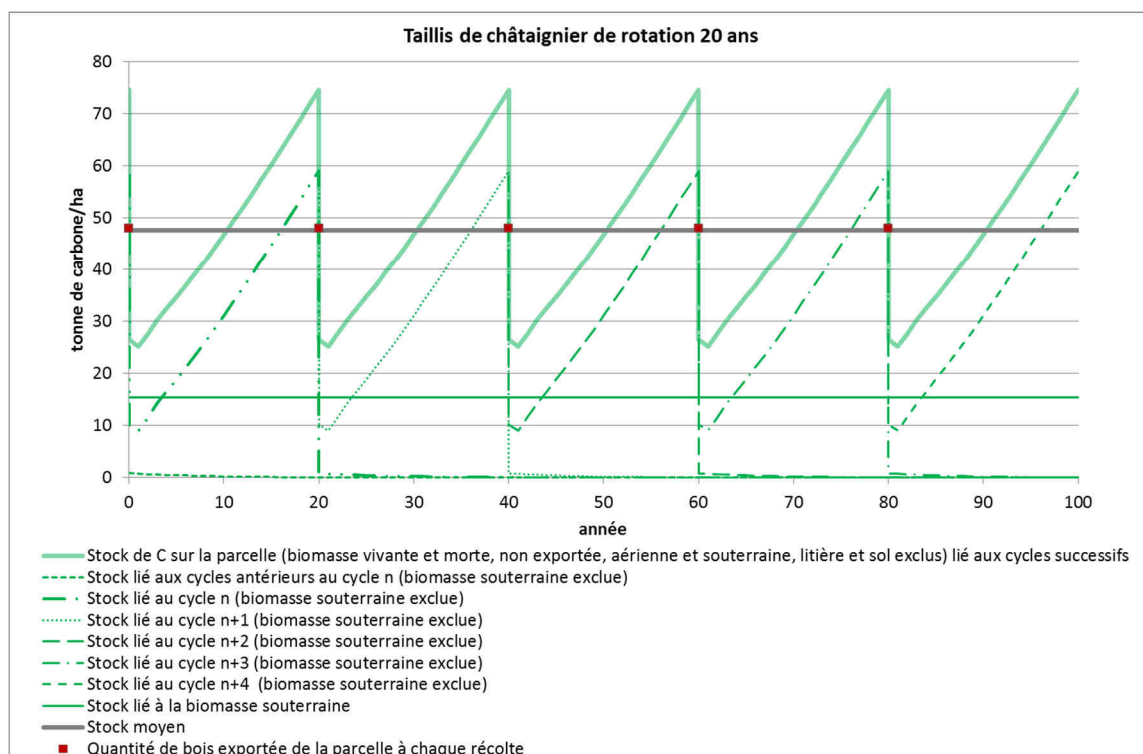


Figure 38 - Représentation schématique des deux hypothèses envisagées dans le cadre de la sensibilité au choix du positionnement du  $t_0$  dans le cycle

Cette hypothèse modifie donc la représentation dans le temps de l'évolution des stocks sur parcelle comme le montre la Figure 39 par rapport à la Figure 8, ainsi que la temporalité des récoltes. En revanche, sauf transformation, le stock moyen et le niveau de récolte ne sont logiquement pas modifiés.



**Figure 39 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle d'un taillis simple de châtaignier de rotation 20 ans avec l'hypothèse  $t_0$ =récolte (hypothèse 2)**

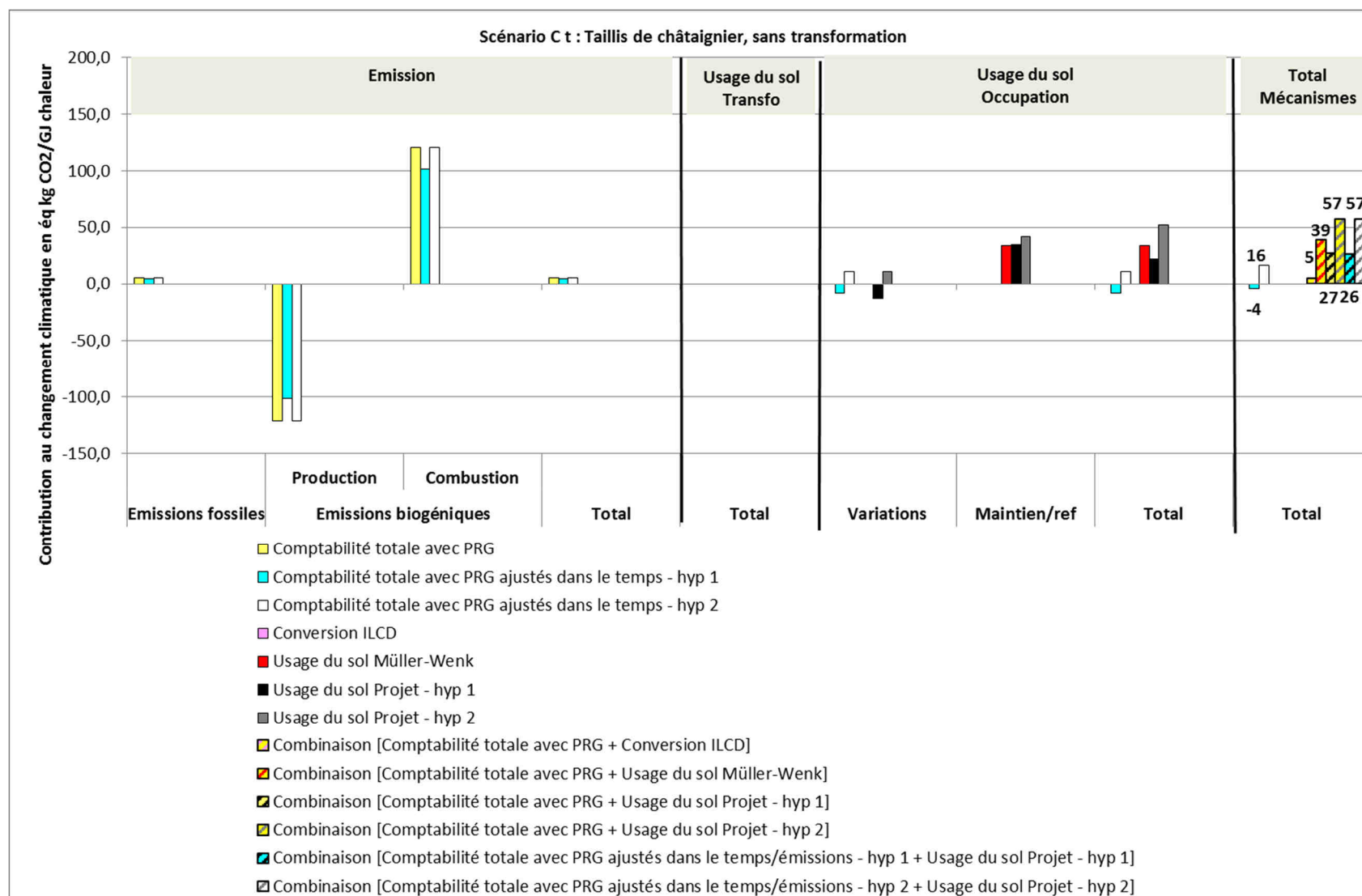
Comme montre la Figure 40, sous l'hypothèse 2, le bilan des émissions obtenu avec les PRG ajusté dans le temps est identique à celui obtenu avec la méthode Comptabilité totale avec PRG, la récolte de bois ayant lieu uniquement à l'année 0 sur le cycle.

Il n'y a pas d'effet de transformation mesuré, car il n'y a aucune variation de stock moyen.

Par ailleurs, la modification de la représentation temporelle de l'évolution du stock de carbone sur parcelle a pour conséquence de modifier le profil d'émissions/captations de l'occupation étudiée, conduisant à des effets de l'occupation opposés à ceux obtenus selon la première hypothèse. Sous cette deuxième hypothèse, on n'observe pratiquement plus de différence sur l'effet de l'occupation lié aux variations de stocks de carbone entre la méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps et la méthode Usage du sol projet/aspect variations du fait que la biomasse morte liée à la récolte à l'année 0 (et sa décomposition qu'il en suit) est affectée pour les deux méthodes au cycle étudié ce qui n'est pas le cas lorsque l'hypothèse 1 est retenue.

Sur les aspects maintiens de l'occupation, on observe que les impacts mesurés sont plus forts avec l'hypothèse 2 qu'avec l'hypothèse pour la méthode Projet d'usage du sol, seule méthode sensible à cette hypothèse.

Sur le bilan global obtenu, l'hypothèse 2 dégrade donc les résultats obtenus, pour les méthodes sensibles à cette hypothèse, avec des résultats variant du simple au double.



**Figure 40 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C t et selon l'hypothèse du t<sub>0</sub> (hyp 1 : reboisement ; hyp 2 : récolte)**



## Sensibilité à l'usage de référence

Les méthodes répondant au cadre conceptuel d'usage du sol font appel à un Usage de référence. Parmi les méthodes mises en œuvre dans le cadre de cette étude, il s'agit des méthodes Usage du sol Müller-Wenk et Usage du sol projet. Pour ces deux méthodes, une analyse de sensibilité des résultats a été réalisée sur deux paramètres de définition de l'usage de référence :

- Un taux d'accroissement biologique supérieur de 20% (hyp 2) par rapport à celui fixé initialement (hyp 1),
- Un stock de carbone à l'équilibre supérieur de 20% (hyp 3) par rapport à celui fixé initialement (hyp 1).

Pour l'évaluation de l'effet de la transformation la méthode projet ne fait pas appel à un usage de référence (voir raisons à la section 2.3), à la différence de la méthode Müller-Wenk. Pour cette dernière, la sensibilité des résultats de l'effet de la transformation est indépendante de la transformation étudiée, uniquement proportionnelle à la durée de vie moyenne de présence du carbone dans l'usage de référence. Une augmentation de 20% d'accroissement biologique fait passer cette durée de 100 à 90 ans et donc a pour conséquence de diminuer de 10% les résultats quel que soit le scénario étudié. De même, une augmentation de 20% du niveau du stock à l'équilibre entraîne un allongement de 12 ans de la durée de vie moyenne, soit une augmentation de 12% des résultats, quel que soit le scénario étudié.

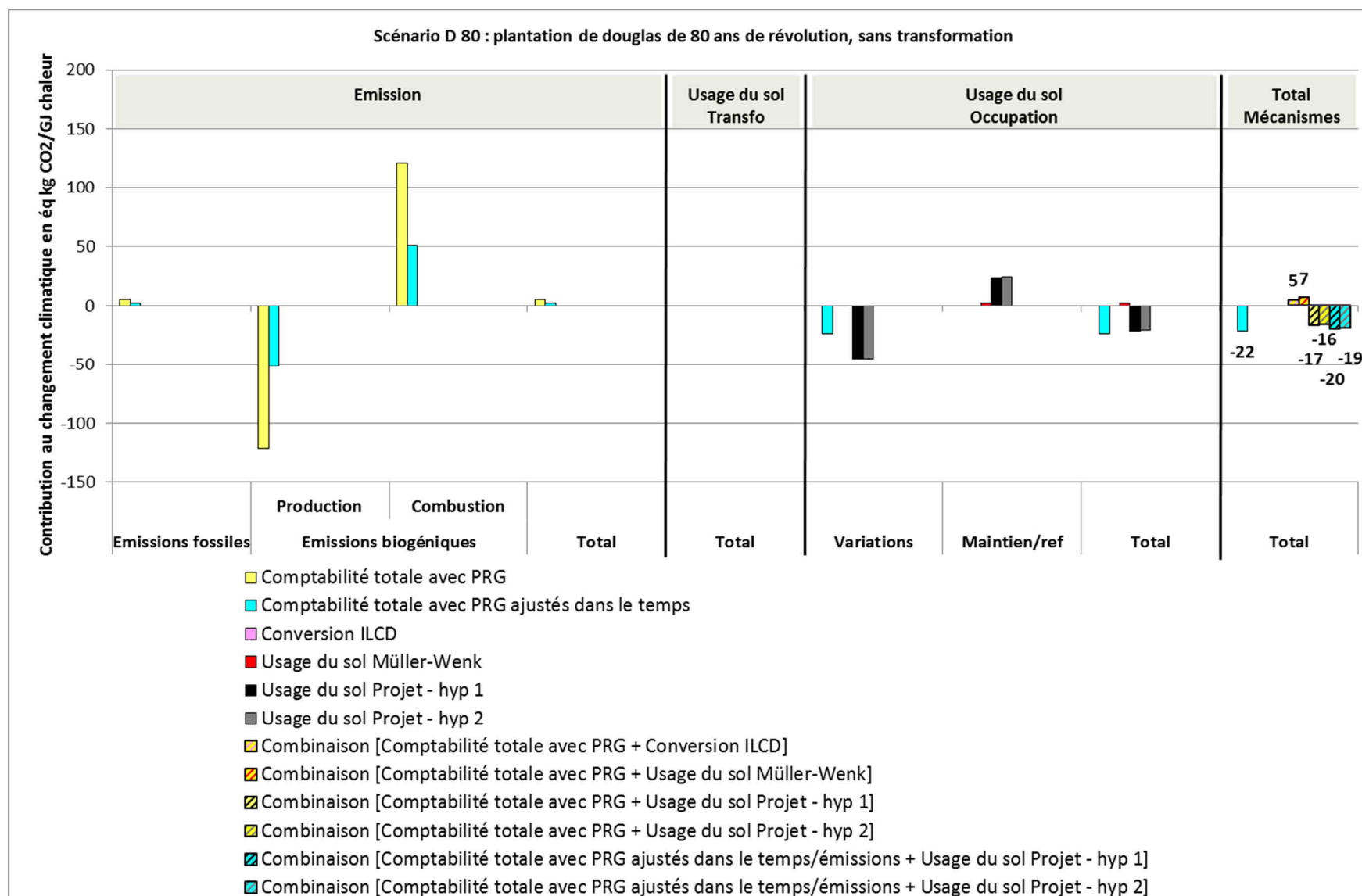
Pour l'évaluation de l'effet de l'occupation, la méthode Usage du sol Müller-Wenk n'est pas sensible à l'hypothèse sur l'accroissement biologique puisque cette méthode ne prend pas en compte la dynamique des stocks. Le Tableau 8 fournit les résultats de sensibilité des impacts de l'occupation en pourcentage pour l'ensemble des scénarios selon les méthodes et les hypothèses.

Méthode occupation	Hypothèses	D80	D60	D40	E ae	E bf	C t	C f
Projet	+20% accroissement biologique (hyp 2)	-4%	2%	3.0%	1.1%	2.0%	2.4%	-1.9%
	+20% stock à l'équilibre (hyp 3)	-16%	-43%	-133%	84%	158%	31%	50%
Müller-Wenk	+20% stock à l'équilibre (hyp 3)	363%	94%	52%	35%	38%	29%	36%

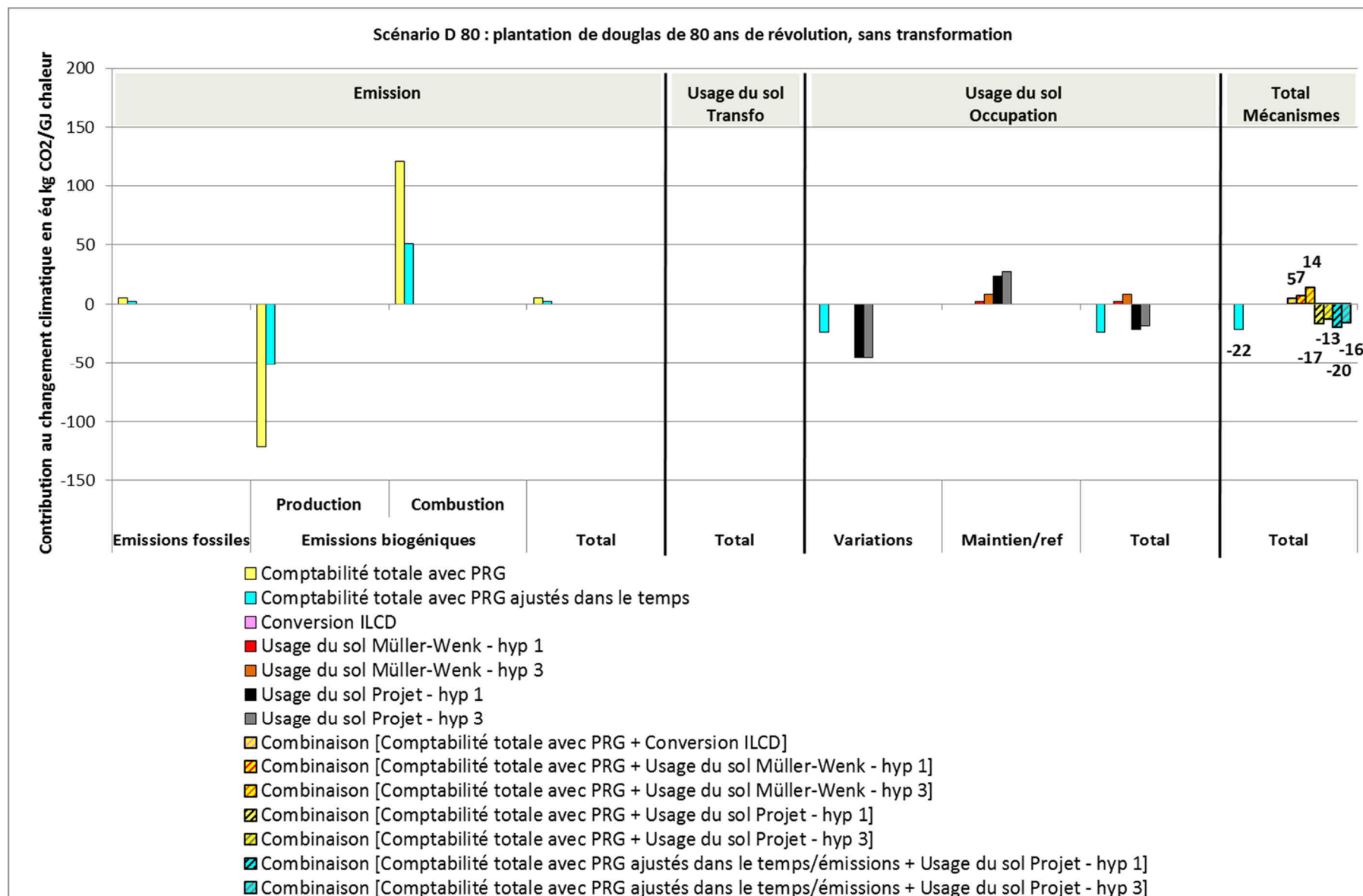
**Tableau 8 – Sensibilité des résultats d'occupation aux hypothèses d'accroissement et de stock à l'équilibre selon les méthodes et les scénarios étudiés**

Pour la méthode Müller-Wenk, l'analyse absolue des facteurs de caractérisation montre qu'une augmentation de 20% du niveau de stock de carbone à l'équilibre a pour conséquence d'augmenter de façon constante le facteur de caractérisation de l'occupation de 714 kg de CO<sub>2</sub>/ha/an, avec donc des répercussions sur les résultats en termes de pourcentage plus ou moins importantes en fonction de l'occupation étudiée (voir Tableau 8). On observe ainsi que pour le scénario de la plantation de douglas de révolution 80 ans (voir La Figure 42), une augmentation de 20% du stock à l'équilibre fait passer l'impact de l'occupation avec la méthode Müller-Wenk de 2 à 9 kg équivalent CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur produite. En revanche pour le taillis de châtaignier, l'augmentation de l'impact ne représente plus que 29% (44 kg équivalent CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur produite au lieu de 34).

Pour la méthode projet, les résultats au niveau de l'impact global de l'occupation (voir Tableau 8) montrent que la méthode est également sensible à l'hypothèse du stock de carbone à l'équilibre et très peu à celle sur le taux d'accroissement biologique (maximum 4% pour le scénario D80, voir Figure 41). Sur cet impact d'occupation par définition seul l'aspect maintien est dépendant de l'usage de référence. L'analyse au niveau du facteur de caractérisation/aspect maintien (différents des résultats présentés dans le Tableau 8 qui tiennent compte également de la productivité de chaque scénario sylvicole) montre qu'une augmentation de 20% du stock à l'équilibre le fait varier de 14% à 23% en fonction de la durée du cycle de l'occupation étudiée, alors qu'une augmentation de 20% du taux d'accroissement de 0.3 à 3%.



**Figure 41 – Contribution au changement climatique selon les méthodes et hypothèses sur l'accroissement biologique de l'occupation de référence, en approche attributionnelle, de l'énergie produite avec le scénario D 80**



**Figure 42 – Contribution au changement climatique selon les méthodes et hypothèses sur le stock à l'équilibre de l'occupation de référence, en approche attributionnelle, de l'énergie produite avec le scénario D 80**

## Sensibilité au choix d'affectation de la transformation de l'usage du sol à l'origine d'une production additionnelle

Le choix d'affectation retenu pour l'évaluation de l'ensemble des scénarios en attributionnel a été physique au contenu en carbone comme expliqué à la section 1.2 (choix 1). L'ensemble des impacts évalués a alors été alloué selon ce critère.

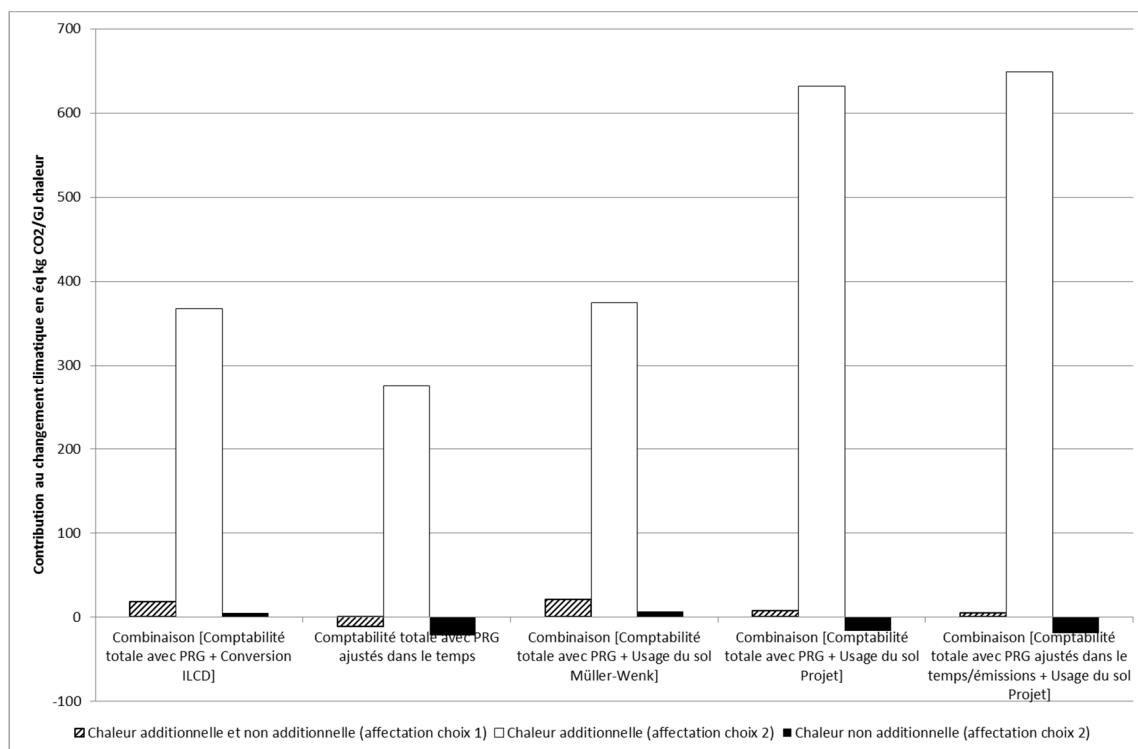
Dans le cadre de cette analyse de sensibilité, il a été étudié sur les scénarios avec une transformation de l'usage du sol qui produisent davantage de biomasse par rapport à l'occupation antérieure, un second choix d'affectation. Ce second choix distingue la biomasse additionnelle et la biomasse non additionnelle par rapport à l'occupation antérieure, en allouant la totalité des effets de transformation à la biomasse additionnelle.

D'un point de vue mathématique, l'ensemble des résultats est lié puisque :

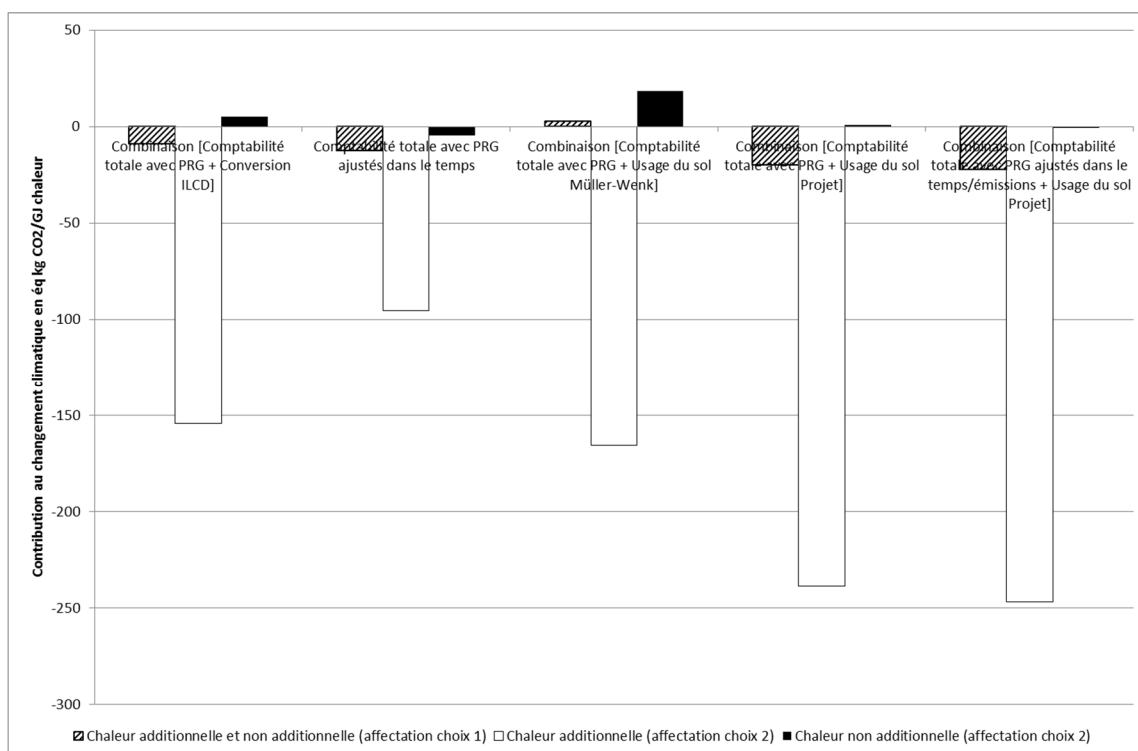
- L'impact obtenu pour la production de chaleur non additionnelle selon ce choix 2 est identique à celui obtenu selon le choix 1 dans le cas sans transformation,
- La somme des impacts obtenus selon ce choix 2 pour les chaleurs additionnelle et non additionnelle, au prorata des quantités produites, est identique à l'impact obtenu selon le choix 1 dans le cas avec transformation.

Parmi les 8 scénarios de transformation étudiés, 4 présentent la configuration nécessaire. Les résultats obtenus selon les deux choix d'affectation et selon les différentes méthodes sont fournis en Figure 43, Figure 44, Figure 45, et Figure 46. On observe ainsi, quelle que soit la transformation étudiée et quelle que soit la méthode d'impact, que les résultats obtenus pour la biomasse additionnelle sont très différents des résultats obtenus selon le choix 1 sans toutefois changer le sens du résultat comparatif entre le bilan de la biomasse produite avec le scénario de transformation et celui de celle produite avec l'occupation antérieure. Si les résultats de l'évaluation servent à prendre une décision relative à la transformation d'usage du sol, le choix de l'affectation n'est donc pas sensible. En revanche, si la comparaison s'effectue avec une énergie produite de façon différente par exemple avec un combustible fossile, les conclusions pourront être radicalement différentes avec le deuxième choix d'affectation par rapport au premier. De même, si l'évaluation sert à établir des déclarations différenciant la biomasse additionnelle de celle non additionnelle, alors les résultats seront très différents.

Enfin on peut noter que la distinction additionnelle versus non additionnelle s'avèrerait dans de nombreux cas extrêmement difficile à faire sur le terrain, même pour la récolte de rémanent qui traditionnellement s'effectue avec le bois fort (arbre entier). Les itinéraires dits « semi dédiés énergie » pour des résineux comme le pin maritime, pour lequel une surdensité de plantation initiale avec récolte dès la première éclaircie permet de produire de la biomasse additionnelle, pourraient cependant s'y prêter.



**Figure 43 – Contribution au changement climatique de l'énergie produite avec le scénario D 60 (80->60) évaluée suivant différentes méthodes et choix d'affectation de la transformation**



**Figure 44 – Contribution au changement climatique de l'énergie produite avec le scénario D 60 (40->60) évaluée suivant différentes méthodes et choix d'affectation de la transformation**

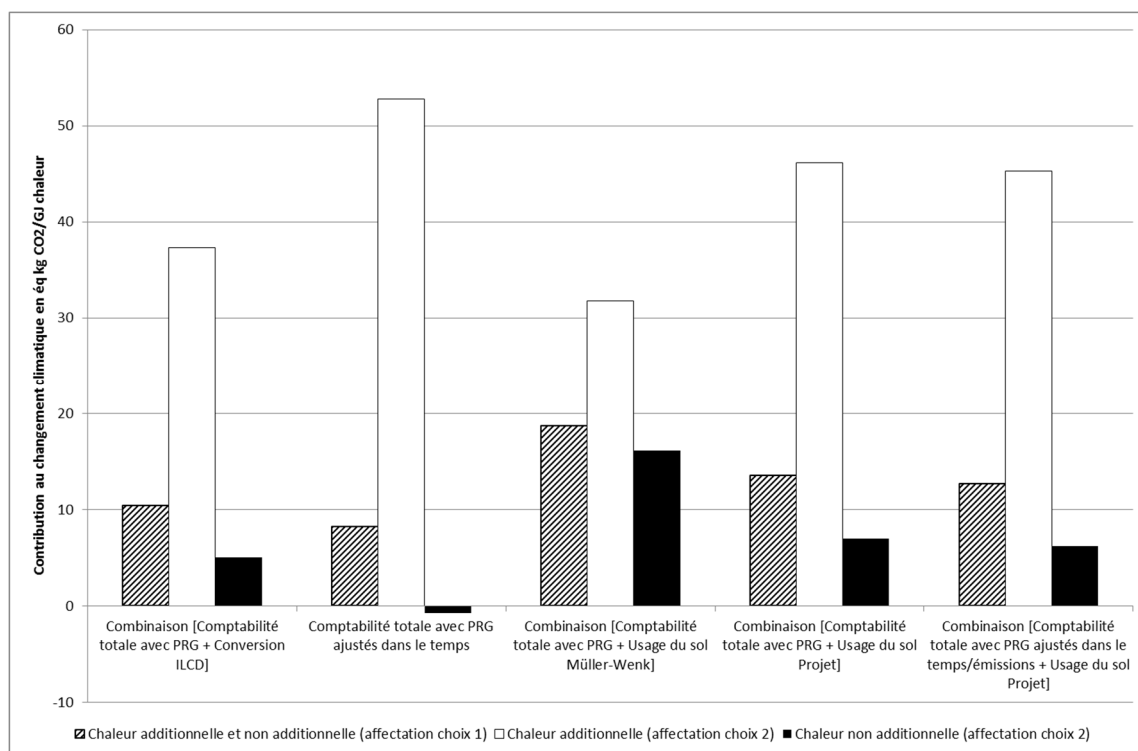


Figure 45 – Contribution au changement climatique de l'énergie produite avec le scénario E ae (bf->ae) évaluée suivant différentes méthodes et choix d'affectation de la transformation

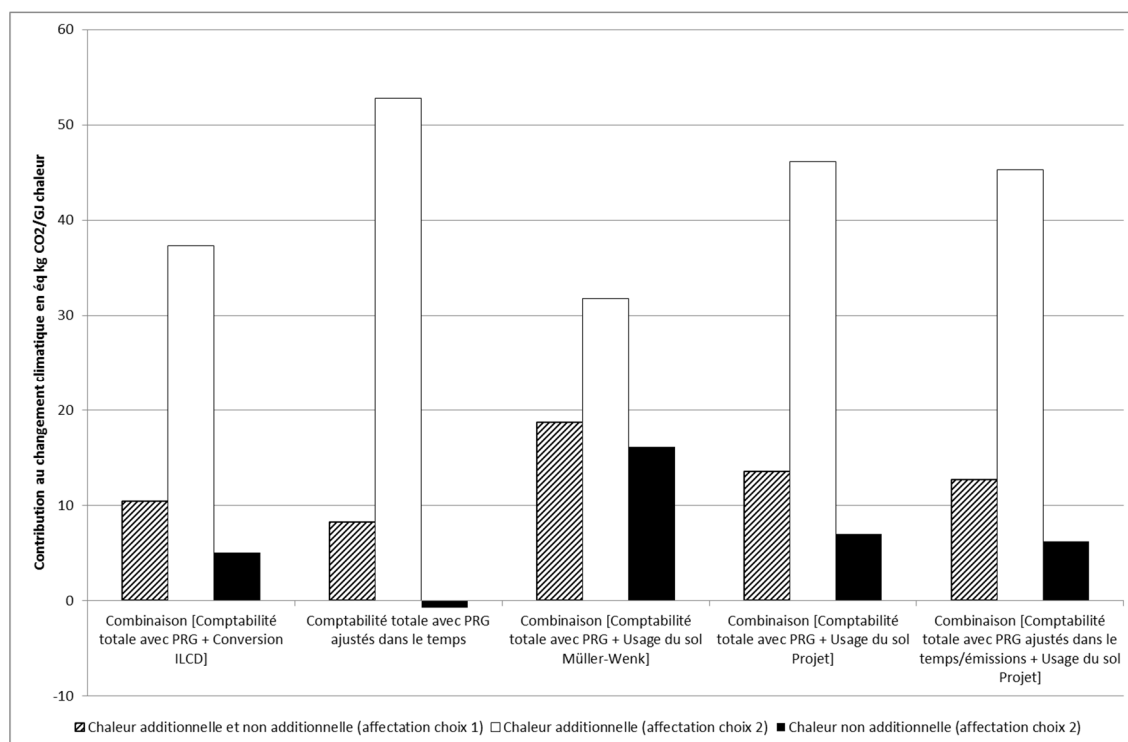


Figure 46 – Contribution au changement climatique de l'énergie produite avec le scénario C t (f->t) évaluée suivant différentes méthodes et choix d'affectation de la transformation



### 3.3. Influence du choix de la méthode d'impact sur les résultats en approche conséquentielle

Comme expliqué au paragraphe 1.2, les calculs réalisés en approche conséquentielle ont été limités à un seul cas d'étude, l'évolution de la récolte du TCR d'eucalyptus de bois fort à arbre entier pour produire de l'énergie. Cette limitation s'explique par le fait que pour les autres évolutions susceptibles d'être évaluées en approche conséquentielle, il serait nécessaire d'élargir les systèmes pour résoudre la multifonctionnalité de l'occupation forestière en faisant appel à des systèmes remplissant des fonctions autres que celle de la production de chaleur (fonctions fournies par les autres usages du bois), dont la modélisation ne fait pas partie du champ de l'étude.

Par ailleurs, pour définir les frontières du système d'étude, les liens de causalité liés à des logiques autres que attributionnelle, tels que des réactions de marché, ont été pris identiques à ceux définis dans la mise en œuvre de la méthode du « temps de retour GES », c'est-à-dire substitution de l'énergie fossile par l'énergie biomasse supplémentaire produite, sans autres conséquences aussi bien au niveau de la production de l'énergie, que de la production de la biomasse.

Enfin, toutes les méthodes étudiées dans le cadre de cette étude ne permettent pas de les mettre en œuvre en approche conséquentielle. C'est le cas de la méthode Usage du sol Müller-Wenk développée uniquement pour l'approche attributionnelle. Le Tableau 9 permet de visualiser quels sont les mécanismes couverts en approche conséquentielle pour chaque méthode dont la mise en œuvre a pu être testée dans le cadre de cette étude.

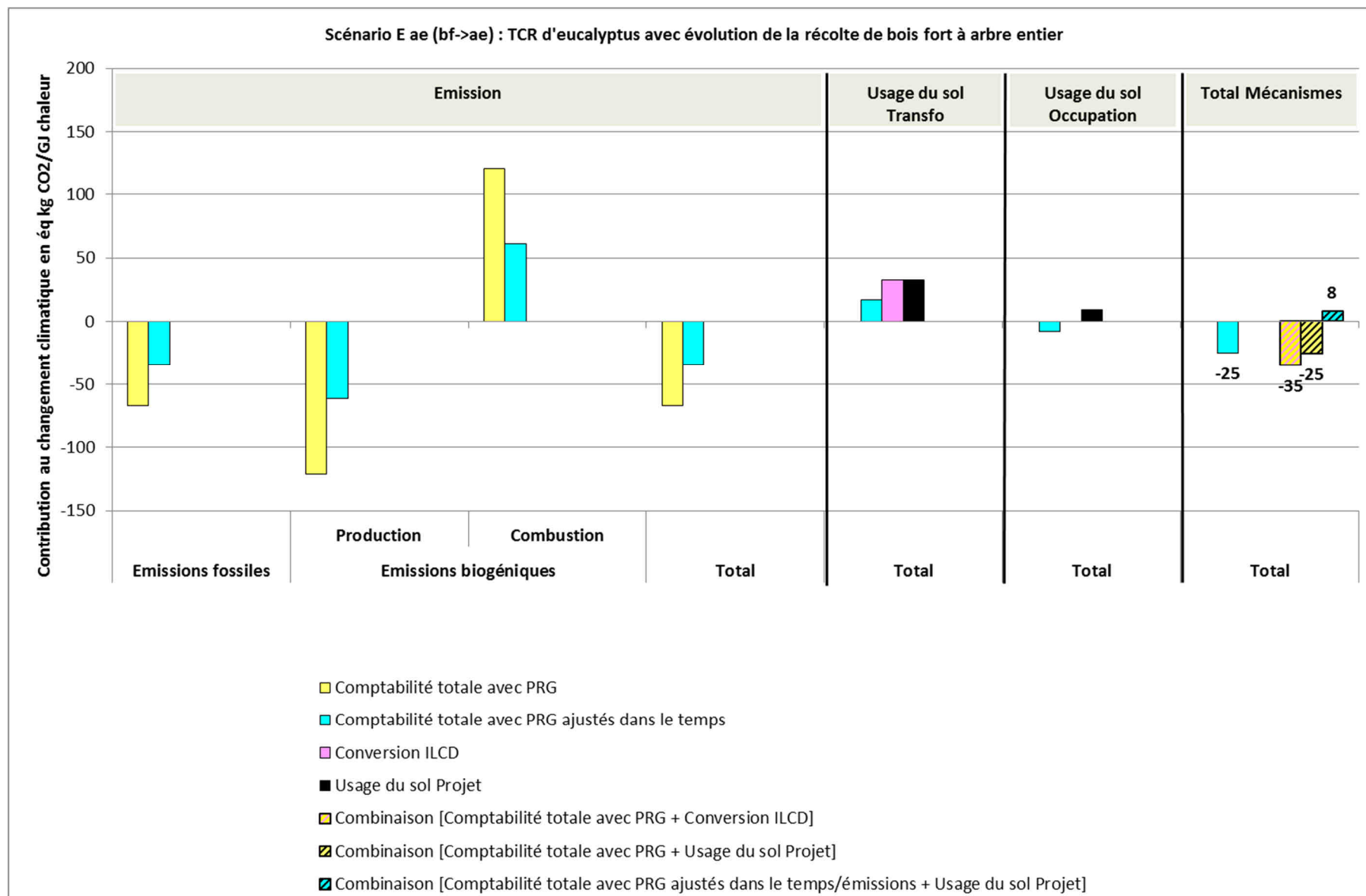
	Comptabilité totale avec PRG	Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps	Conversion ILCD	Usage du sol Projet
<i>Emission de GES</i>	Tous GES	Tous GES	Non	Non
<i>Potentiel de séquestration C : Transformation</i>	Non	Oui	Oui	Oui
<i>Potentiel de séquestration C : Occupation</i>	Non	Oui	Non	Oui

**Tableau 9 – Mécanismes environnementaux couverts en approche conséquentielle par les méthodes d'impact considérées**

La Figure 47 présente les résultats obtenus pour le scénario étudié en approche conséquentielle, par mécanisme environnemental et pour les combinaisons couvrant l'ensemble des mécanismes environnementaux, [Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps], [Comptabilité totale avec PRG + Usage du sol Projet] et [Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps/émissions + Usage du sol Projet], ainsi que pour la combinaison [Comptabilité totale avec PRG + Conversion ILCD] ne couvrant pas le mécanisme de l'occupation de l'usage du sol mais correspondant à la combinaison des méthodes les plus reconnues. Etant seule sur les champs qu'elle couvre, les résultats de cette dernière combinaison ne font cependant pas l'objet d'analyse spécifique, au-delà de celles liées à chaque méthode qui la compose.

#### Influence de la méthode d'impact relative au mécanisme des émissions

Les résultats montrent que, l'impact des émissions biogéniques évalué de façon statique ou dynamique est nul, puisque la combustion a été supposée parfaite : l'ensemble du carbone récolté est ainsi utilisé et réémis sous forme de CO<sub>2</sub>. Pour l'évaluation avec les PRG ajustés dans le temps, il faut noter que l'égalité entre l'impact et le bénéfice s'explique par le fait supplémentaire que la récolte et la combustion se font lors de la même année et que la différenciation temporelle entre captation de CO<sub>2</sub> et récolte est comptabilisée dans le mécanisme d'occupation de l'usage du sol. Pour un usage matériaux avec une valorisation énergétique en fin de vie, il en serait différent, la récolte et la fin de vie du produit bois n'ayant pas lieu la même année, alors que la comptabilité totale avec PRG mesurerait toujours un effet nul. Pour les émissions fossiles, en revanche, les résultats montrent que l'impact varie entre une évaluation avec des PRG ajustés dans le temps et des PRG statiques. Comme en approche attributionnelle, cette différence va dépendre de la définition temporelle des systèmes évalués. Avec les hypothèses  $t_0$  au début du reboisement, l'énergie est produite dans le futur aux différentes périodes de récolte, et donc l'effet de la résultante entre les émissions fossiles liées à la production de chaleur à partir de bois et celles de la production de chaleur à partir de gaz naturel qu'elle permet d'éviter est plus faible avec des PRG ajustés dans le temps qu'avec des PRG statiques.



**Figure 47 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche conséquentielle de l'énergie additionnelle produite avec le scénario E ae (bf->ae)**

A ce niveau, il faut noter que les résultats des émissions fossiles sont négatifs à la différence de ceux observés en attributionnel. Cela provient du fait que la chaleur additionnelle produite remplace de la chaleur produite à partir de gaz naturel permettant ainsi de comptabiliser dans le bilan de la chaleur produite à partir de la biomasse additionnelle l'évitement des émissions fossiles de la chaleur à partir de gaz naturel.

### **Influence de la méthode d'impact relative au mécanisme de la transformation de l'usage du sol**

Dans le cas étudié en approche conséquentielle, le stock de biomasse morte à l'équilibre de l'occupation étudiée est inférieur à celui de l'occupation antérieure. Comme en approche attributionnelle, les résultats de la méthode projet/transformation sont alors identiques à ceux obtenus avec la méthode conversion ILCD.

Dans le cas inverse, il faut noter que l'atténuation du changement climatique mesuré serait très légèrement inférieure tenant compte d'un effet de transition jusqu'à l'équilibre du stock de biomasse morte.

En ce qui concerne la méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, le résultat obtenu est plus faible que celui avec les autres méthodes.

### **Influence de la méthode d'impact relative aux mécanismes de l'occupation de l'usage du sol**

En approche conséquentielle, le mécanisme de l'occupation de l'usage du sol est réalisé à travers un comparatif avec un usage de référence propre à l'objet de l'étude, en s'intéressant aux effets d'une évolution. L'évaluation des effets de l'occupation comprend à la fois un « aspect maintien » et un « aspect variation ».

Entre les deux méthodes possibles pour évaluer l'effet occupation de l'évolution, les résultats obtenus sont radicalement différents. La comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps mesure un bénéfice alors que la méthode projet une contribution au changement climatique. Pour les deux méthodes, l'évaluation repose sur la mesure d'une différence de l'effet de la dynamique des variations annuelles de stock sur les 100 premières années (les années suivantes les PRG ajustés dans le temps étant nuls). En revanche la logique qui consiste à déterminer quels compartiments de biomasse sont inclus dans le périmètre est différente. En effet pour la méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, il convient de considérer l'ensemble des biomasses présentes sur la période de temps analysée, alors que pour la méthode Usage du sol Projet inclut une logique d'affectation des biomasses conduisant à ne pas comptabiliser la biomasse morte provenant des occupations antérieures. Ainsi pour l'évolution étudiée dans le cadre de cette étude, le scénario bois fort permet par la non exportation des rémanents de réduire les diminutions de stock par rapport au scénario arbre entier. Par conséquent, si la méthode ne comptabilise pas la décomposition de la biomasse morte provenant des occupations antérieures alors les effets des variations de stock sont alors plus bénéfiques pour le scénario bois fort. En revanche, dans le cas contraire avec la méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, la différence d'effet de la décomposition de la biomasse agit dans le sens inverse et dans le cas présent de façon plus importante inversant ainsi le signe du résultat.

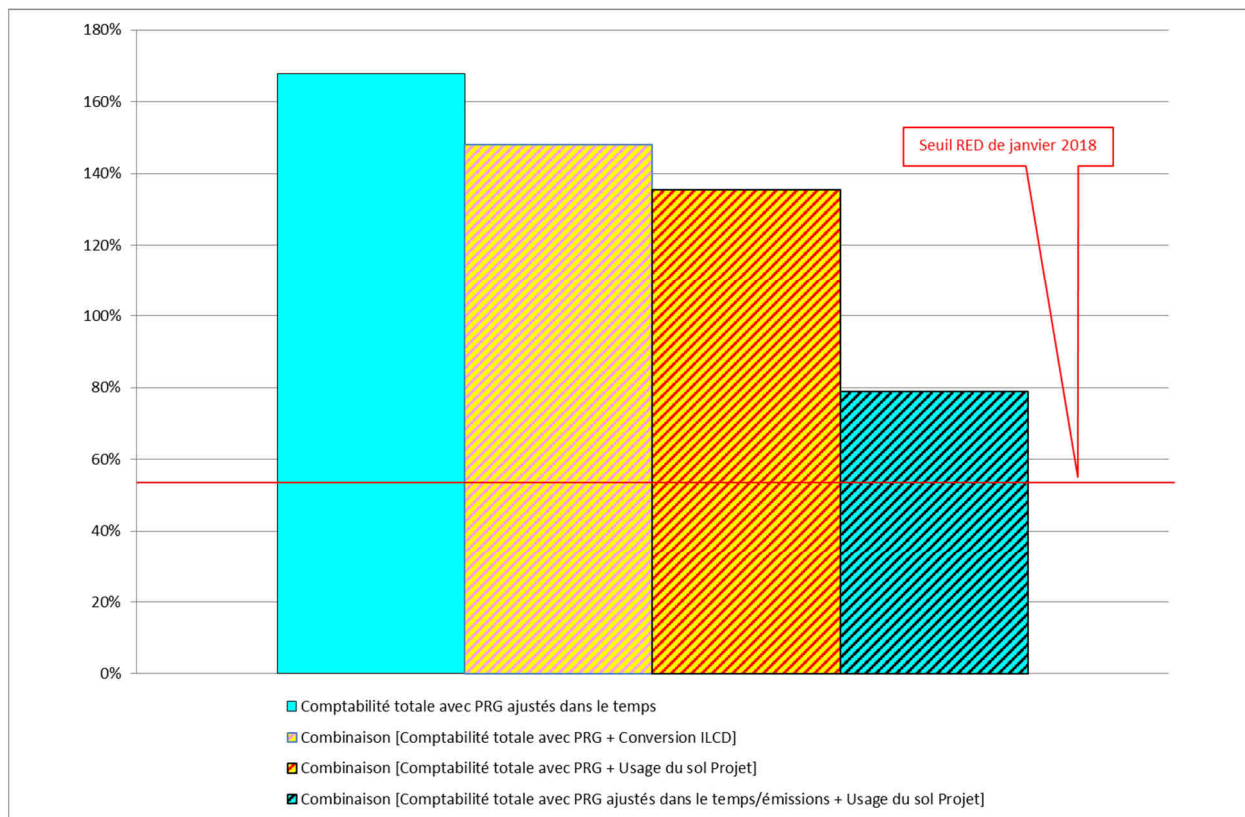
### **Influence des combinaisons couvrant l'ensemble des mécanismes**

Le résultat global obtenu pour notre cas d'étude diffère selon les méthodes considérées :

- Le résultat le plus favorable est obtenu avec la combinaison [Comptabilité totale avec PRG + Conversion ILCD] avec une atténuation au changement climatique de -35 kg équivalent CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur produite additionnelle, mais cette combinaison ne mesure pas d'effet de l'occupation ;
- Le résultat le plus défavorable est obtenu avec la combinaison [Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps/émissions + Usage du sol Projet] avec une contribution au changement climatique de 8 kg équivalent CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur produite additionnelle, cette combinaison accumulant à la fois l'effet atténuateur du bénéfice des émissions avec les PRG ajustés dans le temps, la mesure de l'impact de la transformation la plus forte et un effet négatif de l'occupation ;
- Les deux autres méthodes mesurent un effet également atténuateur de même niveau de l'ordre de -25 kg équivalent CO<sub>2</sub>/GJ de chaleur produite additionnelle bien que les modes de calcul soient différents.

Par ailleurs, concernant l'évaluation par rapport au respect du critère de durabilité de la directive énergie renouvelable exigé pour les biocarburants et bioliquides à partir de janvier 2018 de 60% de réduction d'émissions de GES, les

résultats montrent que le choix de la méthode n'est pas sensible, le seuil de réduction étant respecté quelle que soit la méthode (voir Figure 48).



**Figure 48 – Réduction de GES de l'énergie additionnelle produite avec le scénario E ae (bf->ae) par rapport à la production de chaleur à partir de gaz naturel selon les méthodes, en approche conséquentielle**

Rappel : attention aux comparaisons des résultats selon les différentes méthodes, celles-ci ne couvrant pas systématiquement les mêmes mécanismes environnementaux (voir Tableau 9).

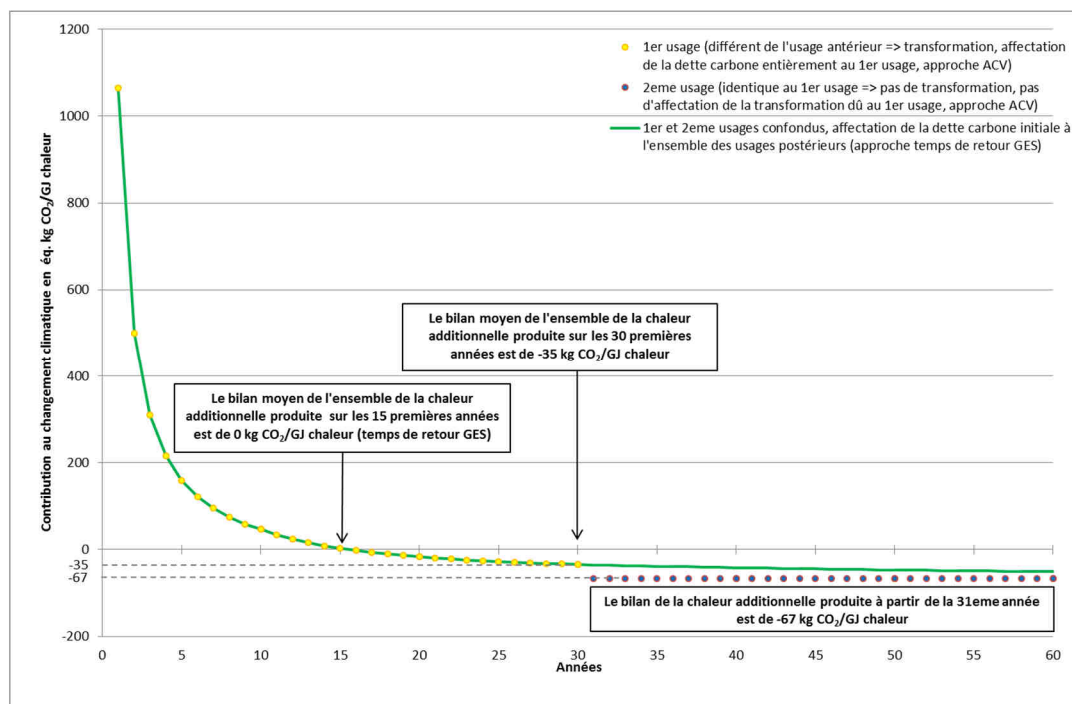
### Indicateur « temps de retour GES »

Un des principes fondamentaux de l'ACV est de rapporter les résultats de l'évaluation à une fonction rendue. Mais il existe également d'autres indicateurs complémentaires, basés sur des résultats d'ACV, mais dont l'expression des résultats diffère. C'est en particulier le cas de la méthode dite du « temps de retour GES » avec des résultats d'impact sur le changement climatique d'ACV conséquentielle de scénarios remplissant les conditions du « temps de retour GES » et évalué à partir de la combinaison [Comptabilité totale avec PRG + Conversion ILCD].

En effet il faut tout d'abord noter que le « temps de retour GES » vise à évaluer spécifiquement une évolution d'usage et n'est applicable qu'à une évolution permettant une augmentation de la production de biomasse à usage énergétique mais s'accompagnant d'une baisse de stock de carbone. Cette méthode comprend également l'hypothèse que l'énergie produite à partir de la biomasse additionnelle remplace de l'énergie produite à partir d'un combustible fossile. Le principe de cette méthode est d'attribuer la perte de stock due à la transformation à la production de chaleur additionnelle produite année après année au cours de l'occupation à l'origine de la transformation. A cet impact s'ajoute également celui des GES fossiles générés pour produire la chaleur biomasse ainsi que celles évitées par le remplacement du système fossile équivalent, dont la contribution au changement climatique est évaluée par les PRG statiques, l'objectif étant de déterminer à partir de combien d'année d'occupation le bilan de la production de chaleur additionnelle devient neutre.

La Figure 49 présente les résultats de cette méthode pour le scénario d'évolution de la récolte de bois fort à arbre entier du TCR d'eucalyptus. Sur cette figure, il est ainsi possible d'observer qu'il faut 15 ans de croissance du TCR pour que

le bilan de la production de chaleur additionnelle soit nulle et que sur l'ensemble du cycle du TCR ce bilan est égale à -35 kg équivalent CO<sub>2</sub>/GJ, résultat obtenu en ACV avec la combinaison [Comptabilité totale avec PRG + Conversion ILCD]. A partir des cycles suivants, la production de chaleur additionnelle n'est plus affectée par l'impact de la transformation.



**Figure 49 – Contribution au changement climatique de la production de chaleur additionnelle à partir d'une évolution de récolte de bois fort à arbre entier de TCR d'eucalyptus selon les hypothèses et méthodes d'impact mises en œuvre par la méthode « temps de retour GES »**

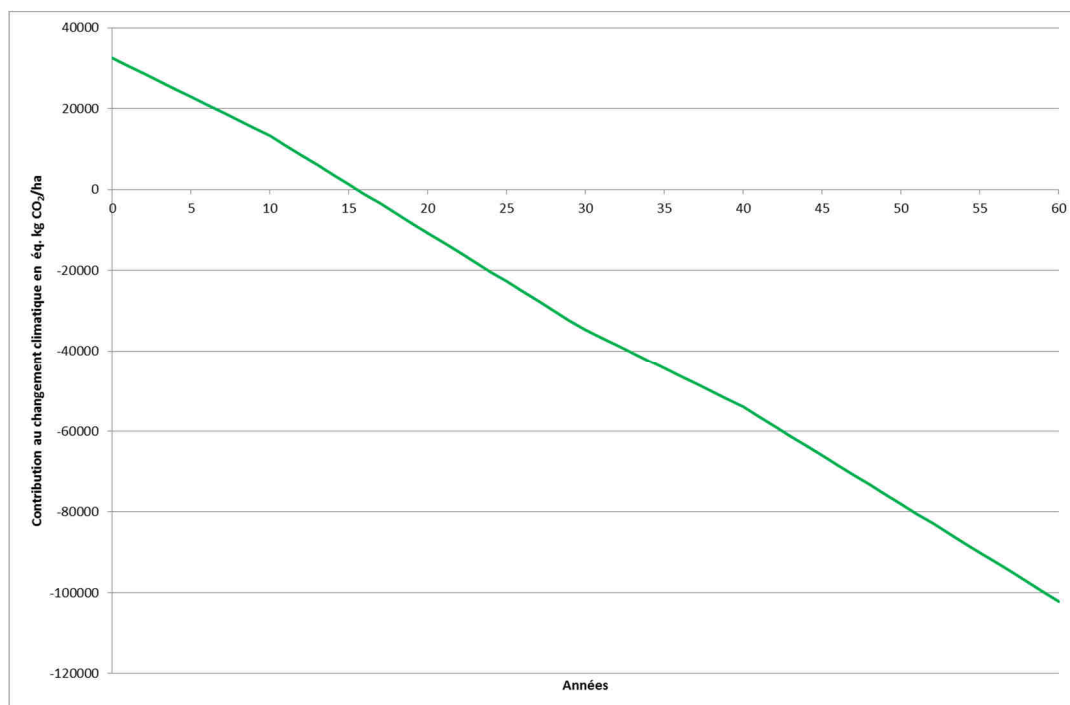


Figure 50 – Contribution au changement climatique de l'évolution de récolte de bois fort à arbre entier d'un TCR d'eucalyptus selon les hypothèses et méthodes d'impact mises en œuvre par la méthode « temps de retour GES »



## 4. Conclusions

Les évaluations réalisées ont permis tout d'abord de tester la faisabilité de la mise en œuvre des méthodes de caractérisation de l'impact sur le changement climatique les mieux notées à l'issue de l'état de l'art, ainsi que de celle proposée dans le cadre de l'étude. Ce test a pu être mené en approche attributionnelle comme en approche conséquentielle. Il a permis de mettre en évidence des difficultés et limites de certaines méthodes non identifiées initialement dans l'état de l'art. C'est en particulier le cas de la méthode Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, dont sa mise en œuvre a révélé une difficulté spécifique à la méthode dans l'interprétation des résultats. En effet, cette méthode, par son principe même de temporaliser les émissions, introduit un paramètre supplémentaire dans la définition de la fonction rendue qui est sa temporalité, dont l'équivalence doit également être vérifiée lors d'une analyse comparative.

Au-delà de la faisabilité de la mise en œuvre, ces évaluations ont permis d'illustrer et de mieux comprendre les différences et points communs entre les différentes approches (attributionnelle versus conséquentielle), les différentes méthodes de caractérisation d'impact sur le changement climatique (Comptabilité totale avec PRG, Comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps, Conversion ILCD, Usage du sol/Müller-Wenk, Usage du sol/projet) correspondant à différents mécanismes environnementaux (émissions, transformation de l'usage du sol, occupation du sol). L'étude a procédé à différentes associations de méthodes pour mener une évaluation la plus exhaustive que possible :

- La comptabilité totale avec PRG et la méthode Conversion ILCD,
- La comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps en incluant la dynamique forestière dans les frontières du système,
- La comptabilité totale avec PRG et l'usage du sol selon Müller-Wenk,
- La comptabilité totale avec PRG et l'usage du sol selon la méthode projet,
- La comptabilité totale avec PRG ajustés dans le temps et l'usage du sol selon la méthode projet.

Les résultats ont montré que la méthodologie ACV, quelle que soit l'approche (attributionnelle versus conséquentielle), peut permettre avec certaines méthodes d'impact d'obtenir des résultats sensibles au système de production de biomasse par la prise en compte du cycle du carbone biogénique, ce que la méthode « neutralité carbone » ne permet pas. Cette sensibilité provient des mécanismes liés à l'usage du sol qui tiennent compte d'un potentiel de séquestration de carbone. Ces mécanismes peuvent se rapporter à une transformation relative à un changement d'usage incluant des évolutions de gestion sylvicole, mais également à une occupation. Ces méthodes peuvent revêtir des concepts différents, basés sur plusieurs notions comme le stock moyen de carbone à l'équilibre, la dynamique des variations de stock de carbone, un usage de référence, l'affectation aux occupations des stocks suivant différentes logiques. La mise en œuvre de ces méthodes nécessite une description des systèmes de production de la biomasse forestière qui fait appel à de nombreuses données, hypothèses et modèles. Suivant les méthodes de caractérisation d'impact, certaines d'entre elles peuvent faire varier les résultats de façon très significative, comme ont pu le démontrer des analyses de sensibilité menées dans le cadre de cette étude. Les informations nécessaires à la description de ces systèmes ne sont pas par ailleurs toujours disponibles. C'est en particulier le cas du compartiment carbone organique du sol qui dans le cadre de cette étude n'a pas pu être inclus dans les calculs. Plus globalement, la mise en œuvre de ces méthodes de façon systématique et en routine nécessiterait la mise à disposition d'une base de données sur la description des systèmes de production de la biomasse forestière qui actuellement n'existe pas, ainsi que d'être en mesure de qualifier les approvisionnements bois selon la typologie de ces systèmes. Sur ce dernier point, l'identification d'une transformation (évolution de pratiques sylvicole), son attribution à un usage spécifique ou non, et sa traçabilité au niveau des plans d'approvisionnement,

Les résultats de ce volet permettent ainsi de compléter l'état de l'art sur un des enjeux majeurs de l'évaluation environnementale du chauffage bois qu'est le changement climatique, afin d'aider à établir des recommandations méthodologiques sur ces systèmes de façon la plus éclairée que possible.

## Références bibliographiques

- BOUVET, Alain, NGUYEN-THE, Nicolas et MELUN, Francis, 2013. Nutrient concentration and allometric models for hybrid eucalyptus planted in France. *Annals of Forest Science*. DOI 10.1007/s13595-012-0259-3
- CAILLY, Priscilla, 2014. Formation modélisation "OASIS : Fonctionnement et mode d'emploi, 18 décembre 2014
- CHERUBINI, Francesco, GUEST, Geoffrey et STRØMMAN, Anders H., 2012. Application of probability distributions to the modeling of biogenic CO<sub>2</sub> fluxes in life cycle assessment. In : *GCB Bioenergy* [en ligne]. novembre 2012. Vol. 4, n° 6, p. 784-798. DOI 10.1111/j.1757-1707.2011.01156.x. Disponible à l'adresse : <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1757-1707.2011.01156.x>.
- CAIRNS, Michael, BROWN, Sandra, HELMER, Eileen et BAUMGARDNER, Greg, 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. — *Oecologia*, vol. 111, n° 1, p.1-11.
- LEMAIRE, Jean, 2008. Estimer la potentialité de son taillis de châtaignier et y adapter les éclaircies. *Forêt-entreprise*, n 179. IDF, p. 14-17
- MONTES, Fernando, CANELLAS, Isabel, 2006. Modelling coarse woody debris dynamics in even-aged Scots pine forests. *Forest Ecology and Management* 221 (2006) 220–232
- PAIXAO, F.A., 2004. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de alternativas de uso de um povoamento de eucalipto. UFV, 149p.
- RANGER, Jacques, GELHAYE, Dominique, 2001. Belowground biomass and nutrient content in a 47-year-old Douglas-fir plantation. *Annals of Forest Science* 58 (2001) 423–430
- SABATIER-TARRAGO, Catherine, 1989. Production de taillis de châtaignier en relation avec les caractéristiques stationnelles. Paris : Université de Paris-Sud, centre d'Orsay, 230 p. (Thèse de doctorat).

## Index des tableaux et figures

### Tableaux <sup>(i)</sup>

Tableau 1 – Scénarios de production de la biomasse retenus pour effectuer les analyses de sensibilité sur les méthodes de prise en compte des effets des stocks et flux de carbone biogénique sur le changement climatique .....	8
Tableau 2 – Description des stocks de carbone en fonction de l'échelle spatiale considérée.....	12
Tableau 3 – Caractéristiques des itinéraires retenus de plantation de douglas.....	14
Tableau 4 – Caractéristiques des itinéraires retenus de TCR d'eucalyptus.....	16
Tableau 5 – Caractéristiques des itinéraires retenus de châtaignier.....	18
Tableau 6 – Mécanismes environnementaux couverts en approche attributionnelle par les méthodes d'impact considérées .....	31
Tableau 7 – Facteurs de caractérisation calculés sur différentes révolutions pour la Méthode d'Usage du sol Projet/occupation Aspect maintien.....	33
Tableau 8 – Sensibilité des résultats d'occupation aux hypothèses d'accroissement et de stock à l'équilibre selon les méthodes et les scénarios étudiés.....	55
Tableau 9 – Mécanismes environnementaux couverts en approche conséquentielle par les méthodes d'impact considérées .....	61

### Figures<sup>(i)</sup>

Figure 1 – Représentation simplifiée des systèmes d'étude et de ses interactions avec le reste du monde en approche attributionnelle.....	10
Figure 2 – Affectation temporelle des occupations dans trois cas d'usages successifs : a) usages successifs identiques, b) usages successifs incluant une régénération, et c) usages successifs incluant une transformation .....	13
Figure 3 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle de douglas de révolution 80 ans .....	15
Figure 4 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle de douglas de révolution 60 ans .....	15
Figure 5 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle de douglas de révolution 40 ans .....	16
Figure 6 – Stocks de C et récolte du bois fort à l'échelle d'une parcelle de TCR d'eucalyptus .....	17
Figure 7 – Stocks de C et récolte de bois arbre entier à l'échelle d'une parcelle de TCR d'eucalyptus.....	18
Figure 8 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle d'un taillis simple de châtaignier de rotation 20 ans avec l'hypothèse $t_0$ =boisement .....	19
Figure 9 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle d'une futaie sur souche de châtaignier de révolution 45 ans.....	20
Figure 10 – Représentation de la dynamique du boisement naturel considéré comme usage de référence .....	21
Figure 11 – Adaptation du cadre conceptuel de l'usage du sol pour l'évaluation de ses impacts sur le changement climatique, dans le cadre de la méthode d'usage du sol Müller-Wenk.....	24
Figure 12 – Adaptation du cadre conceptuel de l'usage du sol pour l'évaluation de ses impacts sur le changement climatique, dans le cadre de la méthode d'usage du sol projet.....	25
Figure 13 – Obtention du profil net d'émissions d'une transformation d'usage du sol, dans le cadre de la méthode d'usage du sol projet .....	25
Figure 14 – Obtention du profil net d'émissions d'une occupation de sol, dans le cadre de la méthode d'usage du sol projet.....	26
Figure 15 – Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage du sol projet pour la prise en compte de l'impact de transformation, en approche attributionnelle : cas sans différence dans le stock de biomasse morte.....	26
Figure 16 – Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage du sol projet pour la prise en compte de l'impact d'occupation, en approche attributionnelle.....	27
Figure 17 - Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage du sol projet pour la prise en compte de l'impact de transformation, en approche attributionnelle : cas avec différence dans le stock de biomasse morte.....	27
Figure 18 – Illustration de l'effet de transition par le scénario évolution de la récolte d'arbre entier à bois fort du TCR d'eucalyptus.....	28
Figure 19 – Influence du choix du stock de démarrage pour la description des profils de transformation et d'occupation sur la détermination des impacts associés dans le cas de $S'_{min} \leq S_{min}$ .....	29

Figure 20 – Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage des sols projet pour la prise en compte de l'impact de transformation, en approche conséquentielle, lorsque $S'_{\min} \leq S_{\min}$ .....	30
Figure 21 – Déclinaison du cadre général de la méthode d'usage des sols projet pour la prise en compte de l'impact d'occupation, en approche conséquentielle .....	30
Figure 22 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 80 .....	36
Figure 23 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 60 .....	37
Figure 24 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 40 .....	38
Figure 25 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 60 (80->60) .....	39
Figure 26 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 40 (60->40) .....	40
Figure 27 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario D 60 (40->60) .....	41
Figure 28 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E bf .....	42
Figure 29 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E ae.....	43
Figure 30 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E ae (c->ae) .....	44
Figure 31 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E ae (bf->ae) .....	45
Figure 32 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario E bf (ae->bf) .....	46
Figure 33 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C t .....	47
Figure 34 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C f .....	48
Figure 35 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C t (f->t).....	49
Figure 36 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C f (t->f).....	50
Figure 37 – Estimation suivant la méthode de la réduction de GES apportée par la production de chaleur selon différents types d'approvisionnements bois par rapport à la production de chaleur à partir de gaz naturel, en approche attributionnelle.....	51
Figure 38 - Représentation schématique des deux hypothèses envisagées dans le cadre de la sensibilité au choix du positionnement du $t_0$ dans le cycle.....	52
Figure 39 – Stocks de C et récolte de bois à l'échelle d'une parcelle d'un taillis simple de châtaignier de rotation 20 ans avec l'hypothèse $t_0$ =récolte (hypothèse 2).....	53
Figure 40 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche attributionnelle de l'énergie produite avec le scénario C t et selon l'hypothèse du $t_0$ (hyp 1 : reboisement ; hyp 2 : récolte) .....	54
Figure 41 – Contribution au changement climatique selon les méthodes et hypothèses sur l'accroissement biologique de l'occupation de référence, en approche attributionnelle, de l'énergie produite avec le scénario D 80 .....	56
Figure 42 – Contribution au changement climatique selon les méthodes et hypothèses sur le stock à l'équilibre de l'occupation de référence, en approche attributionnelle, de l'énergie produite avec le scénario D 80 .....	57
Figure 43 – Contribution au changement climatique de l'énergie produite avec le scénario D 60 (80->60) évaluée suivant différentes méthodes et choix d'affectation de la transformation.....	59
Figure 44 – Contribution au changement climatique de l'énergie produite avec le scénario D 60 (40->60) évaluée suivant différentes méthodes et choix d'affectation de la transformation.....	59
Figure 45 – Contribution au changement climatique de l'énergie produite avec le scénario E ae (bf->ae) évaluée suivant différentes méthodes et choix d'affectation de la transformation.....	60
Figure 46 – Contribution au changement climatique de l'énergie produite avec le scénario C t (f->t) évaluée suivant différentes méthodes et choix d'affectation de la transformation.....	60

Figure 47 – Contribution au changement climatique selon les méthodes en approche conséquentielle de l'énergie additionnelle produite avec le scénario E ae (bf->ae).....	62
Figure 48 – Réduction de GES de l'énergie additionnelle produite avec le scénario E ae (bf->ae) par rapport à la production de chaleur à partir de gaz naturel selon les méthodes, en approche conséquentielle.....	64
Figure 49 – Contribution au changement climatique de la production de chaleur additionnelle à partir d'une évolution de récolte de bois fort à arbre entier de TCR d'eucalyptus selon les hypothèses et méthodes d'impact mises en œuvre par la méthode « temps de retour GES » .....	65
Figure 50 – Contribution au changement climatique de l'évolution de récolte de bois fort à arbre entier d'un TCR d'eucalyptus selon les hypothèses et méthodes d'impact mises en œuvre par la méthode « temps de retour GES » ...	66

## Sigles et acronymes

<b>ACV</b>	Analyse de Cycle de Vie
<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
<b>BIBE</b>	Bois d'Industrie Bois Energie
<b>BO</b>	Bois d'Oeuvre
<b>COV</b>	Composés Organiques Volatils
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>ILCD</b>	International reference Life Cycle Data system
<b>PRG</b>	Pouvoir de Réchauffement Global
<b>TCR</b>	Taillis à Courte Rotation



## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

## ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development. The Agency provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work ADEME helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

ADEME is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Education, Higher Education and Research.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)